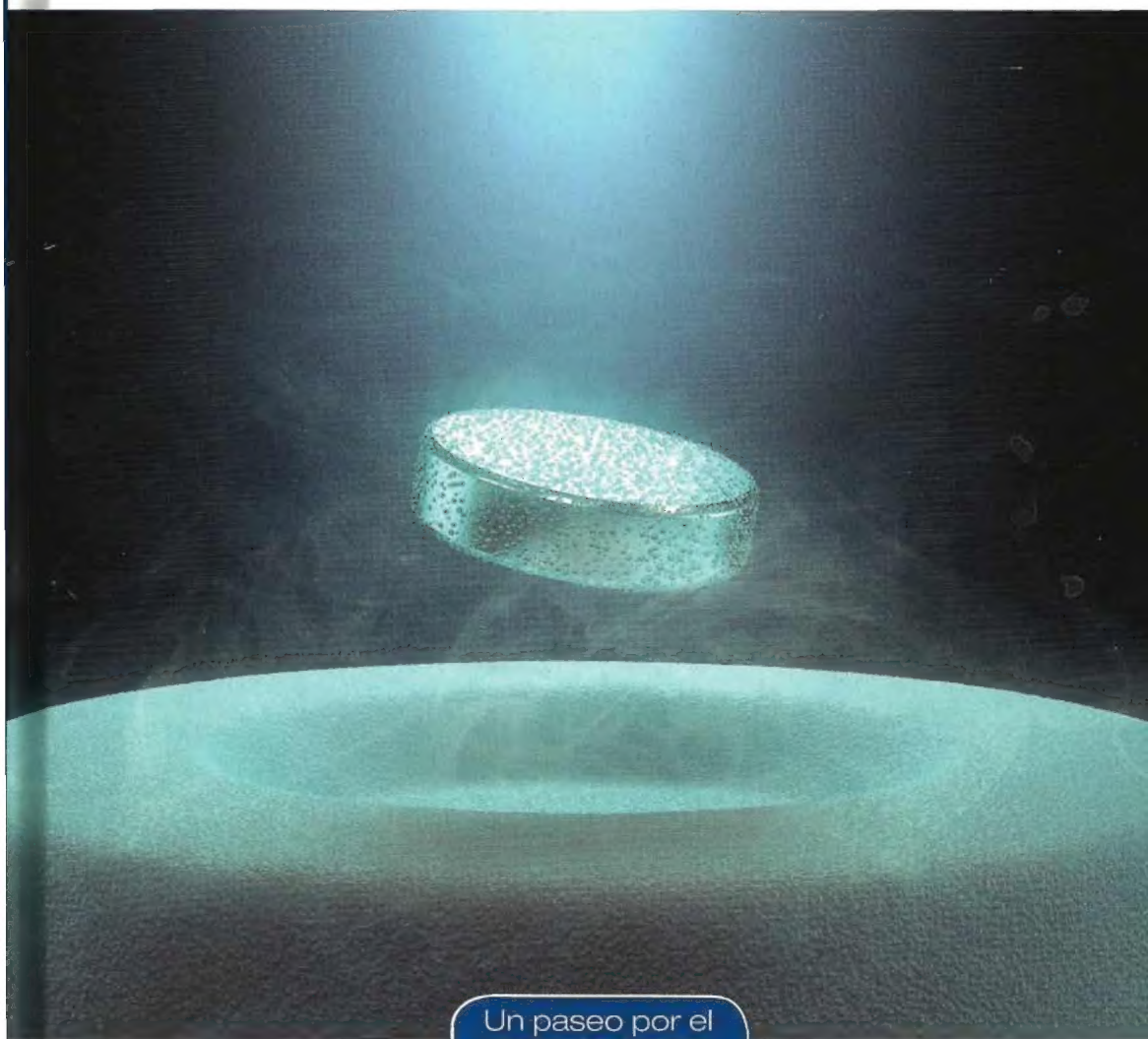


El frío absoluto

El movimiento más lento posible
en el universo



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoueaud.blogspot.com/>

El frío absoluto

El movimiento más lento posible
en el universo

RBA

Imagen de cubierta: Levitación magnética sobre un superconductor a temperatura ultrafría.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Bruno Juliá Díaz por el texto

© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.

© 2016, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Archivo RBA: 44, 58, 73, 79a, 79b; Cesar Cabrera/ICFO: 81a; CERN/Maximilien Brice: 119; Georgia Tech/Gary Meek: 81b; Grupo de Wolfgang Ketterle/MIT: 85; Brocken Inaglory/Wikimedia Commons: 95b; Julian Kelly, Universidad de California en Santa Bárbara: 129; NASA: 99, 112, 134; NASA/D. Berry: 107; NASA/JHUAPL/SwRI: 105b; NASA/JPL-Caltech/MSSS: 122; NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA: 105a; NASA/Sean Smith: 51a; NASA/WMAP Science Team: 111, 113; NIST/JILA/CU-Boulder: 86; Dave Pape: 95a; Nordahl Rolfsen: 43a; Science Photo Library/Age Fotostock: 137; Thinkstock: portada, 51b; U.S. War Department/International Film Service/NARA: 43b.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8566-9

Depósito legal: B-13060-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	El frío y la ausencia de movimiento 13
CAPÍTULO 2	Enfriar hasta que todo sea cuántico 39
CAPÍTULO 3	El condensado de Bose-Einstein 69
CAPÍTULO 4	Temperaturas en el cosmos 91
CAPÍTULO 5	El frío en las fronteras de la ciencia 115
LECTURAS RECOMENDADAS	143
ÍNDICE	145

El frío y el calor han acompañado a la especie humana desde siempre. En ese sentido, pese a estar presentes en nuestra vida cotidiana, su comprensión científica no ha sido fácil de alcanzar. Vivimos en la superficie de un planeta pequeño de climatología suave en comparación con cualquier otro rincón del sistema solar. Aun no siendo un clima particularmente severo, sobrevivir en el planeta ha sido posible a base de desarrollar mecanismos para diferenciar en fracciones de segundo lo frío de lo caliente. Hemos aprendido a combatir el equilibrio térmico con nuestro entorno, al que estamos abocados en última instancia. En nuestro caso, como humanos, luchamos día a día por mantener nuestros treinta y siete grados protegiéndonos del frío o calor circundantes, sabiendo que cualquier desviación puede ser fatal. Aun jugando un papel central en nuestra supervivencia, durante muchos siglos no hubo una comprensión certera sobre cuál era el origen del calor. Todas las sustancias lo tenían, la forma en la que se transfería de unas a otras parecía establecida, pero incluso así nadie entendía por qué existía. ¿A qué era debido? Siglos de experimentación con líquidos y gases permitieron afinar el concepto de calor y pasar de descripciones cualitativas a

cuantificarlo mediante la temperatura y los termómetros. Era un concepto omnipresente en el mundo natural y que parecía afectar a todo lo que nos rodea. El metal, difícil de trabajar a temperatura ambiente, se volvía maleable al darle calor suficiente. Las propiedades de los alimentos cambiaban considerablemente dependiendo de las temperaturas y los tiempos de cocción. Algunas sustancias modificaban radicalmente su comportamiento: de ser cristales cortantes pasaban a líquidos que fluían con facilidad para, al seguir calentando, convertirse en gases y escapar de nuestras manos. Todo esto lo controlaba la temperatura. Los científicos fueron observando ciertos comportamientos universales que abrieron el camino a la comprensión microscópica. Los gases, sin importar si se trataba de oxígeno, nitrógeno o vapor de agua, parecían reaccionar de forma similar al aplicarles calor. Si estaban confinados en un recipiente, hacían más y más presión sobre las paredes. Del mismo modo, si los enfriábamos, disminuía la presión que ejercían sobre él.

¿Qué ocurriría si bajáramos mucho la temperatura? ¿Y si la disminuyéramos tanto que no hubiera presión? Esta pregunta hizo que en el siglo XVIII hubiera ya quien conjeturara que debía existir una temperatura mínima. Una por debajo de la cual no pudiera bajarse más. No ocurría lo mismo al calentar, pues la temperatura parecía poder aumentarse indefinidamente.

Y así fue. La temperatura resultó tener un cero absoluto, si bien las primeras estimaciones sobre cuánto valía exactamente fueron poco afortunadas. Tras algunos esfuerzos se predijo que debía estar en torno a unos -270 grados centígrados (escala Celsius). Desde ese momento comenzó la cuenta atrás hasta alcanzar el cero absoluto.

Poco a poco se fueron entendiendo los orígenes microscópicos del calor. En realidad todo estaba hecho de átomos; pequeños, ínfimos, invisibles al ojo humano. En grandes cantidades, eso sí, pero no de muchos tipos diferentes, y en realidad solo una centena eran necesarios para explicar todo lo que se observaba. Daba igual si se trataba de una piedra, un águila o una estrella, todo estaba compuesto de átomos. Si la sustancia era un gas, estos átomos se movían como bolas de goma chocando con todo

lo que encontraban en su camino. Rebotaban sin cesar surcando el espacio a velocidades supersónicas. Al colisionar contra la pared de un recipiente generaban la presión. Todo se fue entendiendo. Si todo eran átomos tampoco era tan raro que hubiera propiedades comunes a todos los objetos y sustancias. Resultó que el calor, y con él la temperatura, no era más que una medida de la energía cinética de los átomos. Esta es la energía que tienen por el mero hecho de estar moviéndose. Por tanto, disminuir la temperatura era, sencillamente, aminorar la velocidad a la que se movían los átomos. Todo encajaba.

¿O quizá no fuera tan sencillo? Al comenzar a disminuir la temperatura, licuando uno a uno todos los gases que caían en sus manos, los científicos se acercaban al momento en que los átomos se movían cada vez menos. Utilizando una técnica que experimentamos cada vez que usamos un espray, se fueron licuando gases, como nitrógeno, oxígeno e incluso el escurridizo helio. Al ralentizar los átomos y hacer que no se moviesen, las teorías existentes empezaron a hacer aguas. Las leyes que rigen el mundo atómico, tan pequeño, ínfimo, no permiten que los objetos, ya sean átomos, protones u otras partículas se detengan. A estas distancias todo se hace difuso, la posición y la velocidad no pueden definirse de la manera habitual. Las leyes probabilísticas se adueñan de la ciencia. Aparece la física cuántica. Ellas nos dicen cómo se comportan las partículas que pueblan el mundo de tamaños atómicos, y se nos aparecen de manera contundente cuando llegamos a los albores del cero absoluto.

La física cuántica se fue desarrollando a principios del siglo XX, al mismo tiempo que se conseguía licuar el helio. Los científicos teorizaron sobre las consecuencias impredecibles y sorprendentes que tiene la teoría. Satyendra Nath Bose, un físico indio, y el por entonces ya famoso Albert Einstein, entendieron cómo se comportan los grupos de partículas cuánticas, y no lo hacen del modo al que estamos acostumbrados. Por ejemplo, un gas que en condiciones normales podemos describir con el símil de las bolas que chocan, en realidad al bajar la temperatura hace cosas extrañas. Dependiendo de cómo se comporten sus átomos, acabará teniendo un comportamiento completamente diferente.

Si es el de los bosones, partículas como la de la luz o como el bosón de Higgs, el gas resultante puede llegar a formar un estado fascinante, el condensado de Bose-Einstein. Este es una suerte de sistema cuántico de tamaño macroscópico formado por miles o millones de átomos que se comportan como si fueran uno solo. Si, por el contrario, su conducta es la de los fermiones, como los electrones que portan la carga eléctrica a través de cables, o los protones y neutrones que conforman los núcleos atómicos, no tendremos condensado: en su lugar entrará en juego el principio de Pauli, que nos dice que los fermiones del mismo tipo prefieren no juntarse demasiado. En lugar de condensarse forman una especie de mar difícil de comprimir presente, por ejemplo, en las estrellas de neutrones.

Para conseguir el primer condensado de Bose-Einstein, tras años de trabajo infructuoso utilizando técnicas más o menos estándares, hubieron de entrar en el juego del frío los físicos atómicos. Estos desarrollaron técnicas para frenar los átomos a base de iluminarlos con haces de luz láser. Unidas a otras formas de enfriamiento, consiguieron temperaturas nueve órdenes de magnitud menores, del orden del nanokelvin (1 nanokelvin equivale a 10^{-9} kelvins, una milmillonésima de kelvin, y una temperatura de 0 kelvin [K], es decir, el cero absoluto, es igual a $-273,15$ °C). A estas temperaturas tan bajas y con los gases atrapados en regiones del espacio vacío mediante trampas magnéticas, como si estuvieran levitando sobre un imán, se observó la transición. El gas pasaba de comportarse como lo hace habitualmente a hacerlo como habían conjeturado Bose y Einstein setenta años antes. La excitación fue mayúscula: no solo se habían conseguido las temperaturas más bajas del universo conocido, sino que se había demostrado experimentalmente una de las predicciones más curiosas de la mecánica cuántica.

Y es que las temperaturas más bajas que se conocen y que se han medido han sido producidas en laboratorios terrestres, aunque nuestro entorno cósmico cercano experimenta temperaturas que no existen en el clima de la Tierra. Observamos temperaturas extremas, tanto frías como calientes, en casi todos los planetas: zonas de frío cercano al cero absoluto en algunos crá-

teres lunares y en miniplanetas del cinturón de asteroides, llegando a su *sumum* en el sistema Plutón-Caronte. Este planeta enano y su luna presentan temperaturas de decenas de kelvins, mares de nitrógeno helado... un paisaje soñado para un físico que estudie la superconductividad. Saltando de nuestro sistema solar al universo en su conjunto descubrimos que vastas extensiones del cosmos se hallan a una temperatura cercana al cero absoluto, marcada por la denominada radiación de fondo de microondas, que nos enseña el modo en que se formó y expandió nuestro universo, y nos proporciona información valiosa acerca de cómo era poco tiempo después de la gran explosión en la que nació, el Big Bang.

En la actualidad se están explorando algunas aplicaciones, tanto tecnológicas como de ciencia básica, en las que intervienen temperaturas muy cercanas al frío absoluto. En este sentido, para poder desentrañar los ladrillos de los que está hecha toda la materia se necesita alcanzar temperaturas situadas a solo dos grados por encima del cero absoluto, con el fin de enfriar los imanes que dirigen los haces de partículas en el acelerador del CERN y conseguir que colisionen a grandes energías. A esa temperatura cero aparecen cambios en las propiedades de los materiales que no tienen parangón en nuestro mundo cotidiano.

Es de destacar, asimismo, el papel del frío en la computación y simulación cuánticas. Estas aprovechan al máximo las particularidades de la materia a bajas temperaturas para resolver problemas impensables con los ordenadores actuales. Las tecnologías implicadas están desarrollándose a pasos de gigante en estos momentos y deberían revolucionar las herramientas indispensables para una mejor comprensión del mundo.

La capacidad para detener la putrefacción y conservar alimentos y tejidos es otro aspecto conocido del frío que ha dado pie a novedosas aplicaciones. Así, en los últimos treinta años se ha conseguido desarrollar y perfeccionar técnicas para preservar células humanas particularmente relevantes: espermatozoides, embriones e incluso óvulos son congelados rutinariamente en clínicas de todo el globo. Sus funciones vitales se detienen al bajar la temperatura hasta unos -200 °C, y en ese estado pueden

mantenerse años para después ser descongelados y continuar su actividad biológica: fecundar un óvulo en el caso de espermatozoides, seguir con el desarrollo en el de los embriones o ser fecundados si se trata de óvulos.

Este libro constituye todo un viaje fascinante a un mundo frío, el del frío absoluto.

El frío y la ausencia de movimiento

Distinguir lo frío de lo caliente es una de las capacidades básicas para sobrevivir en el mundo que nos rodea. Entender qué hace que los objetos estén más o menos fríos requirió remover los cimientos del conocimiento establecido y construir la conexión entre lo infinitamente pequeño y los objetos cotidianos.

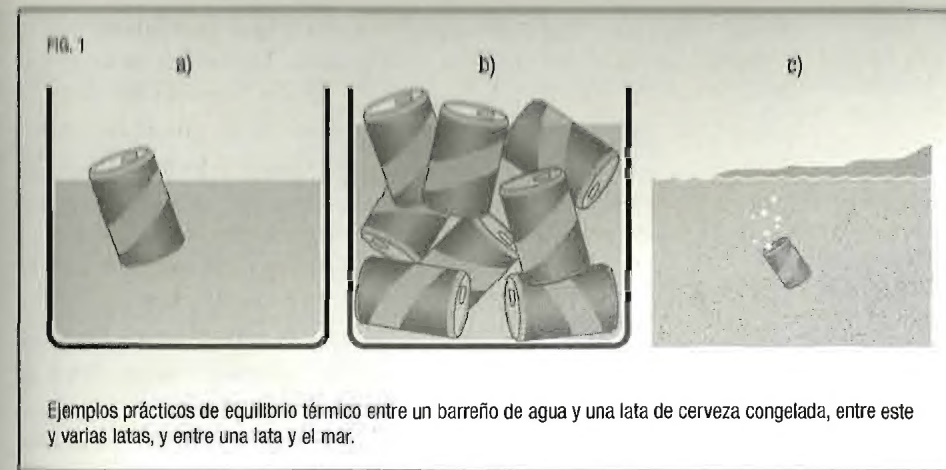
El concepto de temperatura está presente en nuestro devenir cotidiano desde, probablemente, el inicio de los tiempos. Nuestro cuerpo, como el de muchos otros animales, es sensible a cambios de temperatura, lo que nos da una herramienta fundamental para nuestra supervivencia. Aun sin saber definir con precisión la temperatura, hay un par de conceptos sobre ella que podemos llegar a conocer muy bien a través de nuestra experiencia cotidiana. Si uno pone en contacto dos objetos que están a temperaturas diferentes, como por ejemplo una lata de cerveza congelada y un barreño de agua del grifo (figura 1a), pasado un cierto tiempo ambos tendrán la misma temperatura, de tal forma que, siguiendo con el ejemplo, al tocarlos no notaremos ninguna diferencia entre ambos. Esta temperatura común que adquieren tanto la lata como el barreño es un poco más baja que la que tenía el agua originalmente y bastante más alta que la de la lata helada. En cualquier caso, el resultado final es que el cuerpo inicialmente más frío se calienta y el más caliente se enfría.

Asimismo nuestra experiencia cotidiana nos dice que si en lugar de utilizar una lata congelada para intentar bajar la temperatura del barreño, cogemos varias (figura 1b), la temperatura fi-

nal de equilibrio será más baja. También esta temperatura estará más cercana a la del sistema más grande. De hecho, si en lugar de introducir nuestra lata congelada en un barreño de agua la sumergimos en el mar (figura 1c), tenemos claro que el resultado final será que tendremos una lata de cerveza a la temperatura del mar, ¡pero no un mar helado!

Estos dos aspectos están relacionados con lo que se denomina *equilibrio térmico*, que *grosso modo* dice que, en ausencia de fuentes y sumideros de calor, la temperatura de varias sustancias puestas en contacto acaba por igualarse. En esta descripción hemos aludido a las fuentes de calor, otro factor al que también estamos expuestos aun sin saberlo. Si cogemos un cazo lleno de agua y lo situamos sobre un fuego de la cocina, observamos que la temperatura del agua (y del cazo) aumenta a medida que pasa el tiempo. El calor de la llama hace incrementar la temperatura, que de este modo pasa a estar directamente relacionada con la transferencia de calor. Este fenómeno podría entenderse de este modo: cada cuerpo posee cierta cantidad interna de calor y al poner dos en contacto, ese calor fluye del cuerpo que tiene más (el más caliente) al que tiene menos (el más frío), hasta que se alcanza un equilibrio. Esta descripción es la que llamamos *teoría del calórico* y estuvo completamente aceptada por la comunidad científica hasta finales del siglo XVIII. Más tarde se describió la relación entre trabajo mecánico y calor, la misma que hace que la broca de un taladro inicialmente a temperatura ambiente alcance temperaturas muy altas después de perforar una pared de ladrillo. Esa relación entre el rozamiento y el aumento de temperatura nos da una pista capital sobre la equivalencia entre el concepto de calor y el concepto de trabajo mecánico. Fue Benjamin Thompson quien estableció la relación entre ambos a finales del siglo XVIII. Pocos años después, el físico francés Sadi Carnot estudió la máxima eficiencia energética que podía tener un motor, descubriendo que el trabajo que podía obtenerse de una fuente de calor estaba firmemente limitado.

Siguiendo con nuestro repaso de lo cotidiano, también sabemos que las propiedades de muchos materiales cambian cuando



varía su temperatura. La mantequilla es cada vez más maleable y fácil de deformar a medida que se va calentando. Lo mismo ocurre en general con los metales: para moldearlos es necesario que estén a alta temperatura, siendo difíciles de deformar cuando están fríos. El número de ejemplos es ingente, prácticamente todo a nuestro alrededor cambia cuando modificamos su temperatura. Los alimentos se pudren a temperatura ambiente y no en el congelador, el agua fluye a una temperatura y es sólida como una roca si la bajamos lo bastante, los granos de maíz se transforman en palomitas al aumentarla lo suficiente...

Esta capacidad de la temperatura para modificar el estado de los cuerpos es lo que precisamente nos permite medirla. Si conocemos cómo afecta el cambio de temperatura a un material podemos idear una escala, definir una unidad de medida y cuantificar con ellas qué temperatura tiene este o aquel cuerpo. Una vez somos capaces de medir la temperatura ya es posible realizar experimentos sistemáticos e intentar entender cuál es su esencia, qué significa exactamente y estudiar cómo afecta a muchas otras propiedades. Este paso de calificar a cuantificar es la esencia de la ciencia moderna. En general no hace falta cuantificar para entender los mecanismos: saber que las masas se atraen permite entender por qué cae una manzana madura.

EL DIABLO DE MAXWELL

Una de las más famosas paradojas relacionadas con el concepto de temperatura se la debemos al físico escocés James Clerk Maxwell. Aparte de realizar aportaciones capitales en la formalización de la interacción electromagnética, la responsable de que las brújulas apunten al norte, de que los electrones corren por los circuitos de nuestros aparatos electrónicos y muchas más cosas, Maxwell propuso un peculiar experimento en el que ponía a prueba el conocimiento de la época sobre calor y temperatura.

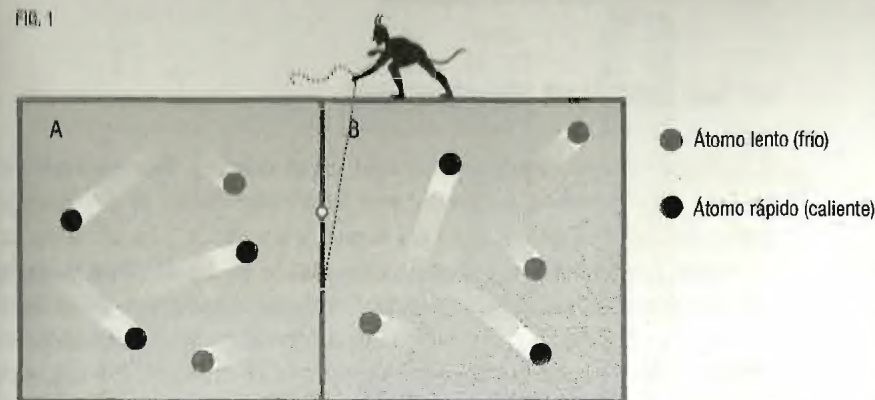
El segundo principio de la termodinámica

Si ponemos en contacto dos objetos a temperaturas diferentes, estos tienden a equilibrarse. Por ejemplo, si enfiamos un globo lleno de helio, de esos que gustan tanto a los niños, y juntamos el gas de su interior con el de otro globo más caliente para llenar un tercer globo, la temperatura de este último estará a medio camino de la temperatura original de los dos gases. ¿Sería factible lo contrario? Es decir, si tenemos un gas en un recipiente a una temperatura, ¿puede ser que de repente medio recipiente se ponga a una temperatura y el otro medio tenga otra diferente? Esto, como mínimo, sería raro. No hemos observado nunca este tipo de comportamientos de forma natural, ni con gases ni con líquidos, aunque estos últimos tardan más en homogeneizar su temperatura, lo que hace que al bañarnos en el mar a veces la temperatura del agua sea apreciablemente más baja en el fondo que en la superficie. Esta observación, el hecho de que no se revierta de forma espontánea la mezcla de dos gases a temperaturas diferentes para volver a tener los dos gases originales, es lo que se conoce como el *segundo principio de la termodinámica*. En palabras todavía más llanas, establece que en general los procesos naturales ocurren de forma que siempre aumenta el desorden. En física, este desorden se cuantifica con una magnitud denominada *entropía*.

El experimento de Maxwell

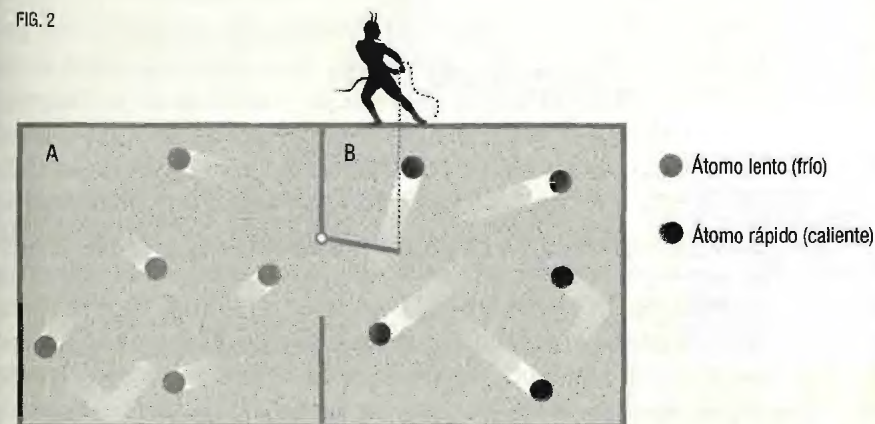
Maxwell propuso el siguiente experimento mental que parecía contradecir el segundo principio de la termodinámica: considérese un recipiente con un gas en su interior y una pared interna que divide el contenedor en dos partes. En dicha pared ponemos una pequeña abertura y a su lado situamos a un diminuto ser, el diablillo de Maxwell (figura 1). Este diablillo tiene la curiosa habilidad de discernir la velocidad de cada molécula de gas que se acerca a la compuerta. Supongamos que el mentado diablillo decide, en su maldad, dejar pasar del lado A al B solo a las moléculas más rápidas. Este simple gesto haría que al cabo de un rato una parte del recipiente contuviera moléculas en promedio mucho más rápidas que las de la otra mitad (figura 2). Así, llegaríamos a tener a cada lado de la pared dos gases a temperaturas diferentes, yendo de un estado inicial más mezclado a uno final más ordenado. La respuesta a esta paradoja, en la que se produce separación en contra de lo establecido en el segundo principio, requiere tener en cuenta las propiedades del diablillo y considerar seriamente que la operación que realiza, abrir y cerrar la trampilla, hace que el proceso no sea espontáneo.

FIG. 1



La figura ilustra un contenedor lleno de gas que dispone de una trampilla que conecta dos zonas diferenciadas (A y B). En esta situación inicial, el gas tiene átomos fríos y átomos calientes en ambas partes.

FIG. 2



Este es el estado del gas después de pasado un tiempo con el diablillo haciendo de las suyas. Lo que hace el diablo es abrir la trampilla para permitir el paso desde el lado A al B siempre que ve que un átomo caliente (veloz) se acerca. Esto hace que al final tengamos átomos rápidos (calientes) en el lado B y lentos (fríos) en el A.

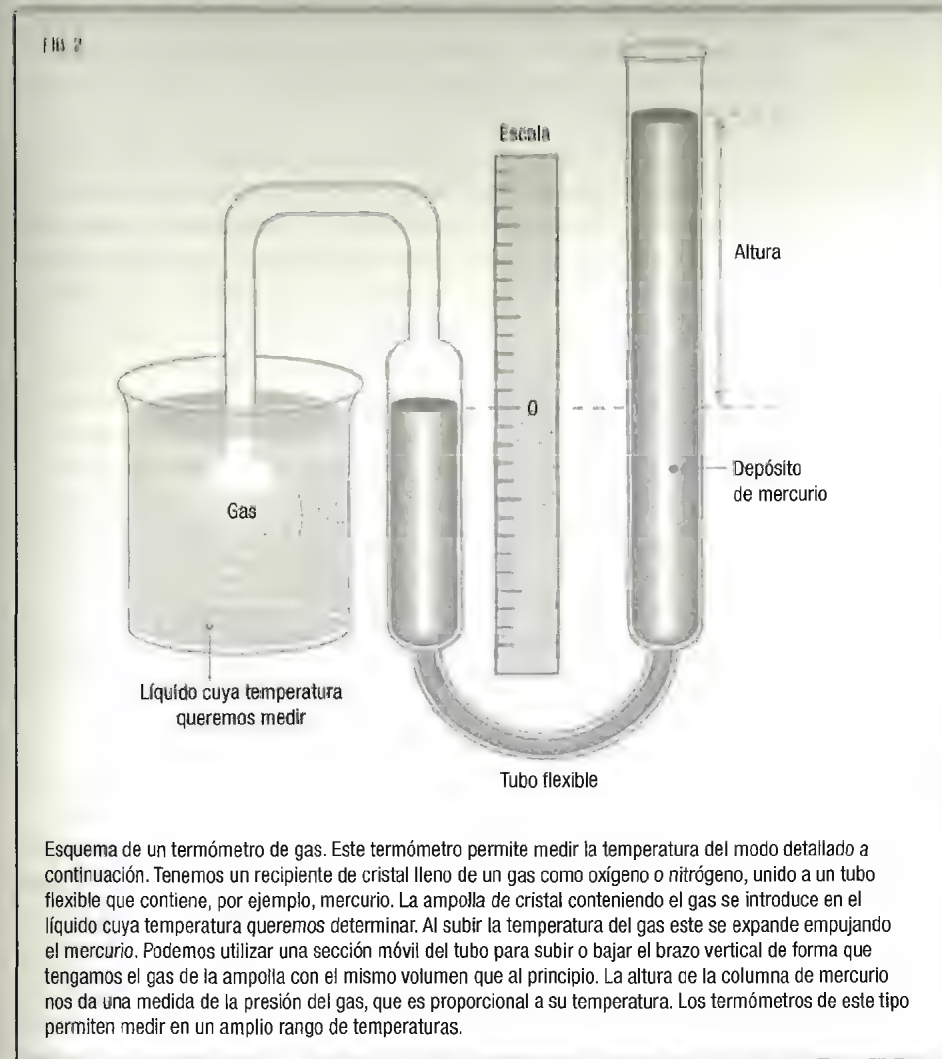
Sin embargo, necesitamos poder medir las fuerzas de atracción para describir con precisión la trayectoria parabólica de un proyectil o la elíptica de un planeta.

LO QUE MIDEN LOS TERMÓMETROS

Construir termómetros es un arte en sí mismo. Por ejemplo, si lo que pretendemos es medir temperaturas como la del cuerpo humano, que sabemos está en torno a los 37°C , lo ideal es un material que se dilate de forma apreciable al cambiar un poco la temperatura en torno a esa cifra. Un buen candidato es el mercurio, metal líquido a temperatura ambiente cuyas propiedades son sensibles a temperaturas cercanas a la nuestra. Un aspecto importante de un termómetro, como le ocurre a cualquier otro sensor que se precie, es que tendrá que ser pequeño comparado con el objeto cuya propiedad se quiera determinar, de forma que sea este el que ajuste su temperatura a la del objeto y no al contrario.

La cantidad de variables y propiedades de materiales que podemos relacionar con la temperatura es amplia: el volumen de un gas (la figura 2 muestra un método para determinar la temperatura de un líquido empleando un termómetro de gas), la resistencia eléctrica de un metal, la radiación electromagnética emitida por un objeto, la elasticidad de un compuesto, etc. Imagínese lo difícil que resulta establecer la temperatura para tal diversidad de comportamientos, teniendo en cuenta que para calibrarlos necesitamos ponerlos en contacto unos con otros. Asimismo es fácil vislumbrar la dificultad inherente a medir temperaturas en condiciones extremas, bien porque el objeto sea muy pequeño —¿cómo medir la temperatura de un pelo?, ¿podremos hacerlo con un termómetro normal y corriente?—, o bien porque esté a una temperatura muy extrema y no tengamos ningún material sensible a tan alta o baja temperatura.

Tras este breve recordatorio de experiencias ordinarias estamos convencidos razonablemente de que sabemos lo que es la temperatura. Aquí la palabra «saber» adquiere, como tantas ve-



ces en ciencia, un sentido algo difuso. Entendemos más o menos qué es lo que estamos diciendo cuando hablamos de temperatura, o, siendo más precisos, entendemos qué ocurre entre objetos de diferente temperatura. Nuestro cuerpo, al estar a una temperatura prácticamente constante, nos proporciona un fantástico

instrumento para valorar las diferencias. Pero ¿qué es el calor? ¿Por qué aumenta la temperatura de un objeto cuando entra en contacto con otro más caliente? ¿Se puede incrementar la temperatura indefinidamente? Y, por ende, ¿se puede disminuir esta tanto como uno quiera?

El calor nunca puede pasar de un cuerpo más frío a otro más caliente sin algún otro cambio, conectado con ello, sucediendo al mismo tiempo.

RUDOLF CLAUSIUS

Responder a estas preguntas no es tarea sencilla. De alguna manera, si a casi todo le podemos asociar una temperatura, esta debe tener que ver con algo común a prácticamente la totalidad de materiales y cuerpos que encontramos en el mundo natural. De alguna forma es una indicación de que todas las cosas están compuestas a partir de un mismo conjunto de elementos. Note el lector el salto conceptual que hemos realizado en la última frase: de observar que podemos asociar algo llamado temperatura a cosas de naturaleza aparentemente tan diversa como un ojo, un zapato o el aire dentro de los pulmones, hemos llegado a afirmar que probablemente todas ellas estén formadas por elementos similares. No fue sencillo llegar a esta conclusión.

¡TODO ESTÁ HECHO DE (MUCHOS) ÁTOMOS!

Hoy día nuestro conocimiento del entorno más inmediato es amplio. Aun no siendo conscientes de ello, estamos rodeados de infinidad de aparatos y dispositivos que han podido realizarse tras una larga observación de lo que acontece en la naturaleza. Nuestro teléfono móvil tiene una pantalla táctil, tecnología basada en el hecho de que las propiedades eléctricas varían con la presión. También dispone de sistema GPS, que recibe ondas electromagnéticas de satélites que orbitan alrededor de la Tierra y permiten al aparato calcular dónde se encuentra en cualquier parte del globo. Cuenta asimismo con una cámara de fotos, que aprovecha nuestro conocimiento sobre la interacción de la luz con la materia para transformar la información luminosa en im-

pulsos eléctricos que después almacenamos aprovechando las propiedades magnéticas de los materiales. Nunca tuvo el ser humano el resultado de tanto conocimiento científico-técnico en su bolsillo, hasta tal punto que la potencia de cálculo de cualquier móvil actual es mayor que toda la que se utilizó en el Proyecto Manhattan (el desarrollo de la primera bomba atómica) o incluso en las misiones Apolo a la Luna. Piénsese que hace apenas un siglo el artificio equivalente al teléfono móvil era el reloj de cadena, ingenio mecánico de gran belleza y complejidad cuyo funcionamiento era el resultado del conocimiento acumulado en mecánica y miniaturización, pero que solo daba la hora!

Disponemos de teorías que explican satisfactoriamente el movimiento de bielas y manivelas en el interior de motores, la aparición de turbulencias en el flujo de los ríos, el porqué del color de las plantas y animales, el devenir de los planetas alrededor del Sol y un largo etcétera. Muchas de estas teorías o modelos funcionan en un determinado rango de tamaños y energías. Por ejemplo, los modelos que permiten entender el comportamiento de los líquidos suelen considerar a estos como un continuo, por lo que pierden su sentido si los aplicamos a tamaños muy pequeños en los que comenzamos a ver que el líquido está formado por moléculas individuales que colisionan unas con otras. En la escuela se enseña que todo está hecho de átomos, aunque en la mayor parte de los casos casi nadie sea capaz de probarlo con experimentos caseros o de encontrar ejemplos en los que la naturaleza atómica se refleje en nuestro día a día.

Los átomos son los ladrillos que forman todo a nuestro alrededor, los cuales están a su vez formados por únicamente tres tipos de pequeñas partículas indivisibles: protones, neutrones y electrones. Bien, en realidad esto no es así: protones y neutrones están contruidos a partir de otras partículas aún más fundamentales, pero esa es otra historia. En realidad, para explicar la mayor parte de lo que vemos, los colores, el movimiento o el calor, no hace falta descender más allá del átomo.

Todo esto es completamente cierto, lo que vemos no son más que diferentes formas de componer diversos puzzles con las mismas piezas, unas ciento y pico si hablamos de átomos. Curiosa-

mente las piezas están unidas unas a otras esencialmente por fuerzas electromagnéticas, como las que hacen que pequeños trozos de papel se queden pegados a un jersey de lana después de frotar este último con un peine. Asimismo cabe recordar que en muchos casos los átomos se unen en grupillos, denominados moléculas, y son estas últimas los bloques mínimos relevantes. Qué consideremos como ladrillos primigenios, ya sean átomos, moléculas o protones, neutrones y electrones, depende de qué fenómeno queramos explicar. Del mismo modo que para describir la receta de la paella no es necesario describir la composición atómica del arroz, para describir el volumen y temperatura de un gas en situaciones más o menos habituales tampoco hace falta saber nada de átomos, electrones y demás.

La enorme variabilidad que vemos a nuestro alrededor, desde plátanos o tabletas hasta galaxias, se debe entre otras cosas a que el número de átomos que compone casi cualquier cosa que vemos es inmenso. Esto hace que podamos encontrar tantas combinaciones como seamos capaces de imaginar, lo que permite formar cosas tan variadas como el mar, un cangrejo, un ordenador o ¡incluso una oreja!

Así pues, en este breve y sucinto repaso de los elementos primigenios que componen todo lo que vemos, tenemos por un lado átomos o moléculas en cantidades ingentes y fuerzas entre ellos. Pero hagamos aquí una breve digresión que siempre es interesante tener en mente. Recordemos que —hasta donde sabemos— la materia que vemos, desde un bocadillo hasta la estrella Polar, toda ella compuesta de protones, neutrones y electrones, no es más que, aproximadamente, un 5% de lo que conforma el universo; además de esto, los astrofísicos nos dicen que hay casi un 30% de materia invisible a la que denominan *materia oscura*, y el porcentaje restante es algo aún más misterioso e indetectable llamado *energía oscura*. De la materia oscura tenemos una clara evidencia indirecta, más o menos como cuando de la sombra de un objeto inferimos su presencia. De la energía oscura, ni eso. Así pues, siendo muy benevolentes, hoy por hoy, aun sabiendo mucho, estamos todavía en los albores de nuestra comprensión del mundo que nos rodea a escalas mucho mayores que la nues-

tra. Siguiendo por esta senda, hay que tener siempre en consideración que de ese 5% que vemos, que podemos tocar, medir, etc., prácticamente todo es hidrógeno, después tenemos algo de helio, oxígeno y poco más. Ese poco más, tan importante para nuestra vida como los metales y otros elementos, es extraordinariamente poco abundante y se ha formado en esos hornos de fundición naturales que son las estrellas.

Volvamos a nuestra historia: tenemos pues átomos y moléculas y fuerzas que los unen. Y ahora empieza lo divertido, ya que estos átomos pueden estar en continuo movimiento, chocando unos con otros con una frecuencia relativamente baja y sin un orden claro. Obedecen las *leyes de Newton*, aquellas que dicen que si algo se mueve y no se le perturba, seguirá haciéndolo indefinidamente. En este caso los átomos están en estado gaseoso. Un ejemplo cercano sería el aire que respiramos. La habitación en la que dormimos se ve surcada continuamente por átomos que viajan a velocidades supersónicas, cruzando el espacio y chocando contra las paredes de forma constante, como minúsculas bolas de billar. También podemos comparar la situación con la de personas corriendo cada una en su dirección, sin ninguna coordinación, y muy deprisa gracias a disfrutar de un espacio lo bastante holgado (figura 3a).

En otras ocasiones nos encontramos con grupos de átomos o moléculas muy juntos, moviéndose también sin ninguna coordinación pero a menor velocidad, igual que la gente apretada en una fiesta (figura 3b). En este caso estamos frente a un fluido, como la sangre, el agua o el magma volcánico. Otras veces los átomos se ordenan formando redes bien definidas y se mueven alrededor de posiciones precisas, de forma similar a los alumnos sentados en un aula, cada uno de ellos fijo en su pupitre pero moviéndose sin parar dentro de esos límites (figura 3c). Este estado es el que denominamos sólido.

En todos los casos, y vale la pena repetirlo, son los mismos átomos los que componen tanto gases como líquidos y sólidos. Lo único que diferencia un estado de otro es la forma en la que están distribuidos o conjuntados dichos átomos. De la misma manera, es muy diferente el comportamiento de un grupo de per-

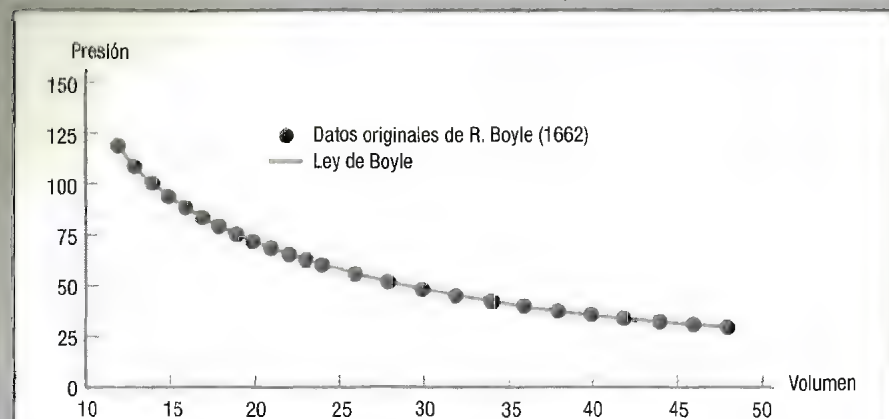
LAS LEYES DE LOS GASES

Haciendo un breve recuento por el tema, con presentaciones observaciones para poner en tallos en cómo se comporta un gas ideal. El gas ideal es una entidad que funciona a la perfección en muchas situaciones de la vida real, y finalmente, con gusto, se supone que el gas está formado por átomos que no limitan a seguir trayectorias rectas y colisionar entre ellos de forma perfectamente elástica, es decir, los átomos se separan después del choque sin sufrir deformación alguna.

La primera de esas observaciones es que si tenemos un gas confinado, digamos en el interior de un pistón, y hacemos que disminuya el volumen, observaremos un aumento de la presión ejercida por él en las paredes del contenedor. Esta pieza de conocimiento, algo más elaborada, se conoce como *ley de Boyle* (véase la figura).

La segunda relaciona el volumen del gas con la temperatura: si tenemos vapor de agua dentro de un pistón en posición vertical y calentamos este último, el aire se calentará, aumentando la temperatura, y el gas se expandirá, aumentando su volumen. Esta es la *ley de Charles*. Por último, si no dejamos que el pistón aumente su volumen y forzamos que se mantenga constante, sobre su parte móvil aumentará la presión, costándonos cada vez más evitar que se mueva. Esta última es la denominada *ley de Gay-Lussac*.

Combinando todas ellas, podemos escribir la denominada *ecuación de estado de los gases ideales*, que relaciona la temperatura, el volumen y la presión del gas ideal: el producto de la presión por el volumen es proporcional a la temperatura.



Robert Boyle fue capaz de medir con precisión los cambios en el volumen de un gas al variar la presión. En la figura vemos una representación de las medidas experimentales de Boyle (bolas), comparadas con lo que predice su ley (línea continua). La ley fue obtenida empíricamente a partir de los datos experimentales. Las unidades de medida eran propias de Boyle; por ejemplo, él utilizaba la altura de su cilindro de mercurio como medida de presión.

FIG. 3



Analogías entre estados de la materia y abundancia de personas en un espacio. El estado gaseoso (a) permite a las personas correr en cualquier dirección sin que nadie les obstaculice el paso, como harían en un descampado poco transitado. El estado líquido (b) también permite moverse a la gente, pero más despacio y con mayor dificultad, como en una fiesta muy concurrida dentro de un local. El estado sólido (c) ya no permite deambular a las personas de un lado a otro; deben permanecer sentadas cada una en su sitio, como en un aula, sin hacer más movimientos que los que puedan hacer sentadas.

sonas en una estación de tren y el del público de un concierto de rock en un festival. En el primer caso cada uno sigue una trayectoria propia buscando su andén, la salida o el aparcamiento, intentando evitar interactuar con otros pasajeros desconocidos. En cambio, en el concierto de rock, aun siendo cada individuo independiente de los otros, hay una mayor interrelación entre ellos en forma de contacto, empujones casuales y pequeñas charlas de grupo. Esta diferencia sería más o menos la que hay entre un gas y un líquido.

TEMPERATURA Y VELOCIDAD

Hay una divertida expresión en castellano que dice que uno no debería confundir nunca el tocino con la velocidad. El significado viene a ser que hay que andar vigilante para no mezclar conceptos que no guardan ninguna relación entre sí. Como habrán podido intuir, el título de la sección juega de alguna manera con esta expresión. ¿Son la temperatura y la velocidad como la

velocidad y el tocho? *A priori* nadie las confunde, nadie dice en un coche: «¡ve más rápido, sube la temperatura!». Sin embargo, ambos conceptos están íntimamente relacionados. Ahora que hemos recordado la base de nuestra descripción atomística de la naturaleza, estamos en disposición de pensar en la temperatura como un promedio de la energía del movimiento de los átomos.

Vayamos poco a poco: a la hora de describir casi cualquier objeto o fenómeno hay dos formas de hacerlo. La primera sería partir desde lo más pequeño e ir entendiendo a partir de allí lo más grande, y se denomina *ab initio*, mientras que la segunda forma es buscar propiedades que sirvan para describir los rasgos más relevantes de lo grande sin tener que entrar en los detalles pequeños. Por ejemplo, en neurociencias podemos intentar comprender cómo las neuronas, sus millones de conexiones y los diferentes neurotransmisores conforman el carácter de un amigo, o utilizar una descripción bastante más grosera y decir que el susodicho es «alegre». Es difícil, si no imposible, cuantificar con precisión qué implica que un individuo sea alegre a un nivel neuronal. Sin embargo, esto no impide que sea tremendamente útil como descripción global, o promedio, de tal individuo. Existen multitud de ejemplos en todas las disciplinas. Así, para describir la resistencia de un material y decidir si se utilizará en una construcción es absurdo intentar entender el movimiento de todos sus átomos para de ahí poder deducir su resistencia. Nótese que decimos absurdo si lo que uno tiene es un interés por la construcción. No es el caso si lo que se pretende es entender de manera profunda el porqué de que unos materiales sean más resistentes que otros. En este segundo caso establecer esta relación entre lo pequeño y su manifestación a gran escala es esencial.

En el caso que nos ocupa, la relación entre el mundo minúsculo y el habitual se estableció a finales del siglo XIX. Curiosamente lo primero que se entendió bien fue el comportamiento del estado de la materia más volátil, el gaseoso. Imaginemos que cogemos un globo y lo inflamamos a pulmón. Tendremos un globo a una cierta temperatura, la del gas que hemos introducido, y presión. Si ahora ponemos el globo en contacto con un objeto a menor

temperatura, por ejemplo, metiéndonos con él dentro de una cámara frigorífica, veremos que el globo se contrae, disminuyendo su volumen, y se vuelve algo más flácido, perdiendo presión. ¿Qué ha ocurrido al bajar la temperatura? La respuesta la dieron físicos como el austriaco Ludwig Boltzmann y hoy parece sencilla. El gas está compuesto de átomos y moléculas que están volando dentro del globo rebotando contra sus paredes. Estos rebotes son la razón microscópica de la presión ejercida por el gas.

Al caer la temperatura pierden velocidad, y al disminuir esta última ya no colisionan con tanto ímpetu contra las paredes del globo. Esto hace que disminuya la presión ejercida por el gas, que ya no consigue mantener a raya a la fuerza elástica de las paredes del globo, haciendo que este se contraiga. ¡Voilà!, la relación entre la temperatura y la velocidad o, para ser más exactos, entre la temperatura de un gas y la velocidad promedio de los átomos que lo componen.

Lo dicho vale para los gases, pero ¿qué les ocurre a los sólidos y líquidos? Lo que en el caso gaseoso es la velocidad, directamente relacionada con un concepto clave de la física, la energía cinética, para un sólido es la energía de los átomos al vibrar y oscilar en torno a sus posiciones. Así, en un sólido denominado cristalino, que tiene los átomos ordenados en una red, estos están continuamente moviéndose alrededor de sus posiciones de equilibrio. Si se mueven más, mayor es la temperatura, si están más quietos, menor. Fue más fácil entender el comportamiento de los gases porque, aunque *a priori* son más difíciles de controlar y observar, una vez los hemos confinado en un recipiente su comportamiento es sencillo. En un gas, al estar los átomos libres, estos en el fondo se comportan como bolas de billar rebotando de forma elástica contra las paredes, que es uno de los problemas básicos y sencillos de la mecánica. La cosa se complica con sólidos y líquidos en los que el contacto entre los átomos, moléculas, etc., hace que el comportamiento sea colectivo, dificultando su descripción.

Es una pena irse, esto comienza a ponerse divertido.

LOUIS JOSEPH GAY-LUSSAC,
ESTANDO MORIBUNDO

Ahora estamos en condiciones de llegar a una conclusión inesperada al principio, que durante siglos nadie podía imaginar y que da título a este libro. Si la temperatura tiene que ver con el movimiento de los átomos, entonces es seguro que si vamos disminuyendo la velocidad de estos podremos ir bajando paulatinamente la temperatura del gas. Este proceso tiene un final claro, cuando todos los átomos que componen el gas se detengan completamente. En ese caso, no se moverán con ninguna velocidad y, por consiguiente, el gas estará a la temperatura más baja posible.

Esta línea argumental, limpia y transparente, es un ejemplo más de cómo la ciencia construye su castillo de conocimientos. En realidad, desde un punto de vista estrictamente cronológico estos argumentos no fueron los primeros que llevaron a los científicos a pensar que había una temperatura mínima posible. La historia de cómo se concluyó que debía haber un cero absoluto de temperatura, temperatura menor que cualquier otra, es la historia de nuestro conocimiento de los gases.

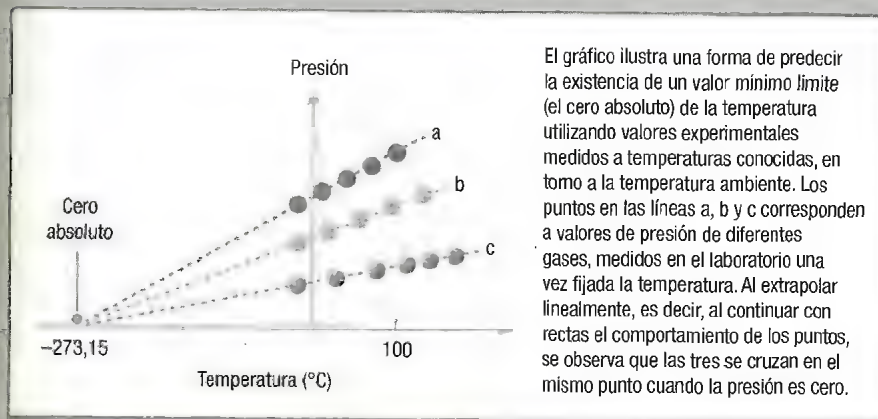
Entre los primeros en postular la existencia de una temperatura mínima se encuentra Guillaume Amontons en el siglo xvii. Conocido por describir las bases de la ley que establece la proporcionalidad entre presión y temperatura, Amontons dedicó parte de su vida a construir termómetros de aire. Con estos ingenios observó el aumento del volumen al calentar agua hasta su ebullición. Sus observaciones, aun siendo rudimentarias, le permitieron elucubrar sobre qué temperatura tendría un gas si en lugar de calentarlo lo enfriamos. Si las cosas eran parecidas a lo que él había observado, si conseguimos disminuir la temperatura, el volumen irá disminuyendo hasta que en un momento determinado será cero. En ese punto, la temperatura será la mínima posible: según parece, el valor que obtuvo fue de -240 grados Celsius, a menos de 40 grados del valor real. Hubo más intentos de buscar esa temperatura mínima a lo largo del siglo xviii por parte de reputados químicos y físicos. Por ejemplo, en el tratado de filosofía química del inglés John Dalton publicado en 1808 hay un capítulo

GUILLAUME AMONTONS Y EL CERO DE TEMPERATURA

La primera publicación sobre la existencia de un cero absoluto de temperatura la presentó Guillaume Amontons (1663-1705), un científico francés que básicamente se dedicó a construir instrumentos de medición, como un termómetro de aire con el que estudió cómo cambiaban el volumen y la presión de los gases al variar su temperatura. Sus trabajos demostraban que la presión que los gases ejercen sobre los recipientes que los contienen se incrementa a medida que aumentamos la temperatura, siendo constantes el volumen y la masa de tales gases. Estas observaciones fueron formuladas con mayor precisión un siglo después por el célebre físico francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850).

Relación entre presión y temperatura

Lo importante del descubrimiento de Amontons es que, utilizando el termómetro que había diseñado, pudo intuir que lo que él observaba estaba en concordancia con la existencia de un mínimo absoluto de la temperatura. Básicamente, su labor consistió en medir temperaturas de objetos o materiales conocidos de su entorno, como el hielo o la mantequilla al derretirse, entre otros, y anotar la presión que ejercía el gas. Así obtuvo una relación de temperaturas con sus valores correspondientes de presión, todas ellas para un mismo gas ocupando idéntico volumen. En sus medidas se observaba que si bajaba la temperatura, lo mismo le ocurría a la presión. ¿Qué pasaba en el caso de bajar la temperatura de forma que la presión fuera cero? (véase la figura). ¿Era esto algo que él pudiera observar en su laboratorio? Si el comportamiento que había encontrado era correcto y se mantenía del mismo modo para cualquier temperatura por baja que fuera, el caso sin presión ocurriría para una temperatura que calculó en unos -240 °C. Es importante destacar que en este avance conceptual en la comprensión de lo que nos rodea, como en tantos otros, jugó un papel esencial el disponer de instrumentos de gran precisión. Amontons se esforzó en calibrar su instrumento de forma que pudiera medir temperaturas con la mayor precisión posible.



El gráfico ilustra una forma de predecir la existencia de un valor mínimo límite (el cero absoluto) de la temperatura utilizando valores experimentales medidos a temperaturas conocidas, en torno a la temperatura ambiente. Los puntos en las líneas a, b y c corresponden a valores de presión de diferentes gases, medidos en el laboratorio una vez fijada la temperatura. Al extrapolar linealmente, es decir, al continuar con rectas el comportamiento de los puntos, se observa que las tres se cruzan en el mismo punto cuando la presión es cero.

dedicado al cero de temperatura en el que repasa los experimentos y estimaciones conocidos hasta la época, concluyendo: «Estamos pues autorizados, hasta que algo más decisivo aparezca, a considerar el cero absoluto de temperatura en 6000 grados por debajo de la temperatura de congelación del agua en la escala de Fahrenheit». Esto son unos 3000 grados bajo cero en la escala de Celsius, una estimación que no es la peor recogida por Dalton en su tratado, aunque todas ellas están en franco desacuerdo con la realidad. Lo importante es que todos los investigadores que se dedicaban al tema entendían que lo que estaban llamando temperatura y que medían con diferentes artilugios era algo que no podía decrecer indefinidamente.

Cero absoluto y escalas de temperatura

Establecer el mínimo de temperaturas con precisión llevó algo más de tiempo. Johann Heinrich Lambert en 1777 y posteriormente Louis Joseph Gay-Lussac en 1802 estimaron con buena precisión el valor del cero absoluto extrapolando con líneas rectas el comportamiento de la temperatura como función de la presión a volumen constante. Estas medidas les llevaron a valores de 273 grados bajo cero en la escala de Celsius. Esta escala denomina cero (que no es la temperatura más baja, ya que las hay negativas) a la temperatura a la que el agua líquida se congela transformándose en hielo.

El siguiente paso importante es asentar una escala de temperaturas razonable y que dependa lo mínimo posible del termómetro utilizado. Esto fue lo que hizo lord Kelvin —título nobiliario del físico británico William Thomson— basándose en los estudios de Sadi Carnot que establecían la equivalencia entre el calor, que pasa de los cuerpos calientes a los fríos, y el trabajo mecánico. Una vez establecida esta relación, Kelvin definió el grado de forma que para aumentar la temperatura un grado haya que hacer siempre la misma cantidad de trabajo. Y una vez establecido el grado, que de hecho coincidía con el grado de la escala Celsius, Kelvin abogó en 1848 con gran tino por estable-

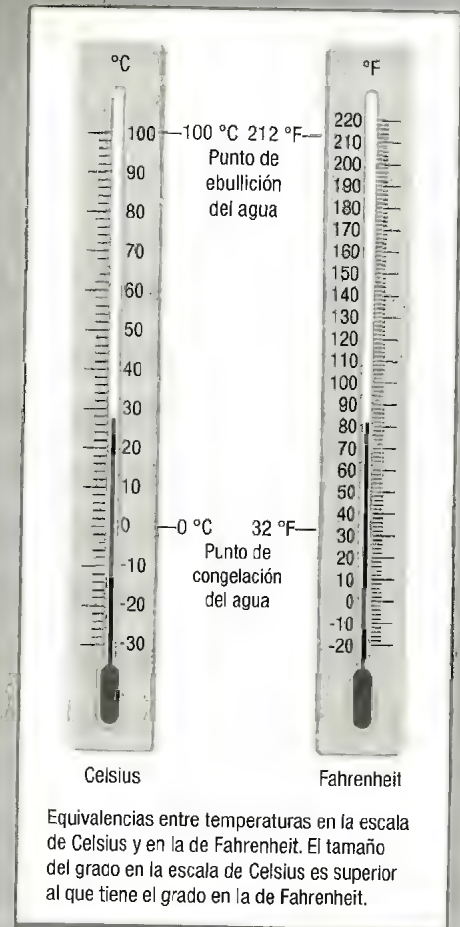
ESCALAS DE TEMPERATURA

La medida de la temperatura para saber comparar valores medidos en diferentes lugares o en diferentes momentos, lleva un cierto tiempo. Aparte de las dificultades propias de diseñar artilugios cuyas propiedades sean de forma sencilla dependiendo de la cantidad de calor, todo lo que define una escala de temperatura es un. Algo parecido ha ocurrido con casi todas las magnitudes, un ejemplo son las escalas de distancias, para las que tenemos diferentes estándares. Con la temperatura se utilizan hoy tres escalas habitualmente, dos de ellas en situaciones corrientes y una tercera en el ámbito científico. Las dos primeras son la de Fahrenheit y la de Celsius; la última es la de Kelvin.

Es interesante conocer la definición que el propio físico alemán Daniel G. Fahrenheit hizo de su escala a principios del siglo xviii: «La división de la escala depende de tres puntos fijos [...] El primero y más bajo de la escala se corresponde con el de una mezcla de hielo y salmuera. El segundo es el punto en el que el agua líquida y el hielo coexisten; este será 32 grados. El tercer punto, 96 grados, es el que se obtiene si el termómetro se sitúa en la boca o axila de un hombre sano».

La propuesta de Celsius

La escala de Celsius es parecida a la que propuso inicialmente el físico sueco Anders Celsius en 1742. Este situó el 0 de su escala en la temperatura de ebullición del agua y el 100 en la de su congelación, ambas a presión atmosférica normal. ¿No hay algo raro en esta definición? Exactamente, está justo al revés de como la conocemos! Una vez invertida, poniendo el cero en la congelación y el 100 en la ebullición, tenemos la escala habitual de grados Celsius. Obsérvese que uno de los problemas entre esta escala y la de Fahrenheit es que el tamaño del grado difiere, como se aprecia en la figura. No así entre la de Kelvin y la de Celsius, que solo difieren en que la de Kelvin sitúa el cero en el mínimo absoluto de temperatura ($-273,15^{\circ}\text{C}$).



cer la mínima temperatura de la escala en el valor cero. Esta es hoy la escala de temperaturas más razonable y utilizada mayoritariamente en la comunidad científica, aunque para uso común son más empleadas la escala de Celsius y la de Fahrenheit. La primera, que es la que estamos acostumbrados a utilizar en la mayor parte del mundo, usa como temperaturas de referencia las de la fusión y la ebullición del agua. La segunda, empleada en Estados Unidos, usa como referencias la temperatura de una mezcla de salmuera helada y la temperatura promedio del cuerpo humano.

Temperaturas bajas a nuestro alrededor

¿Cuál es ese valor más bajo posible de la temperatura?, ¿es uno con el que nos topemos en nuestro día a día?, ¿dónde podemos encontrar cosas tan frías? Primero recordemos que nosotros, los humanos, nos movemos en un rango más o menos pequeño de temperaturas, si todo va bien, durante toda nuestra vida. En todos los casos alrededor de los cero grados centígrados. Esta es una temperatura muy baja y peligrosa para nuestra vida, debido en gran parte a que estamos hechos mayoritariamente de agua, por lo que a esa temperatura podemos congelarnos, igual que un cubito de hielo. Durante el año, dependiendo de la zona geográfica donde vivamos, podemos encontrarnos de forma natural con temperaturas más bajas que esa y considerablemente más altas. Tenemos otra temperatura relevante: aquella a la que el agua líquida hierve ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) transformándose en vapor de agua. En nuestra vida intentamos continuamente mantenernos a temperaturas razonables, alejadas de los 0 y los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, de forma que nuestro cuerpo pueda mantenerse sin mucho esfuerzo en su valor óptimo, unos $37\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el planeta en que vivimos, o para ser más precisos, en su superficie, no hay grandes variaciones naturales de temperatura. Por poner un ejemplo, en un día cualquiera de verano las temperaturas mínima y máxima de las aguas de todos los mares rondan los $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, algo así como

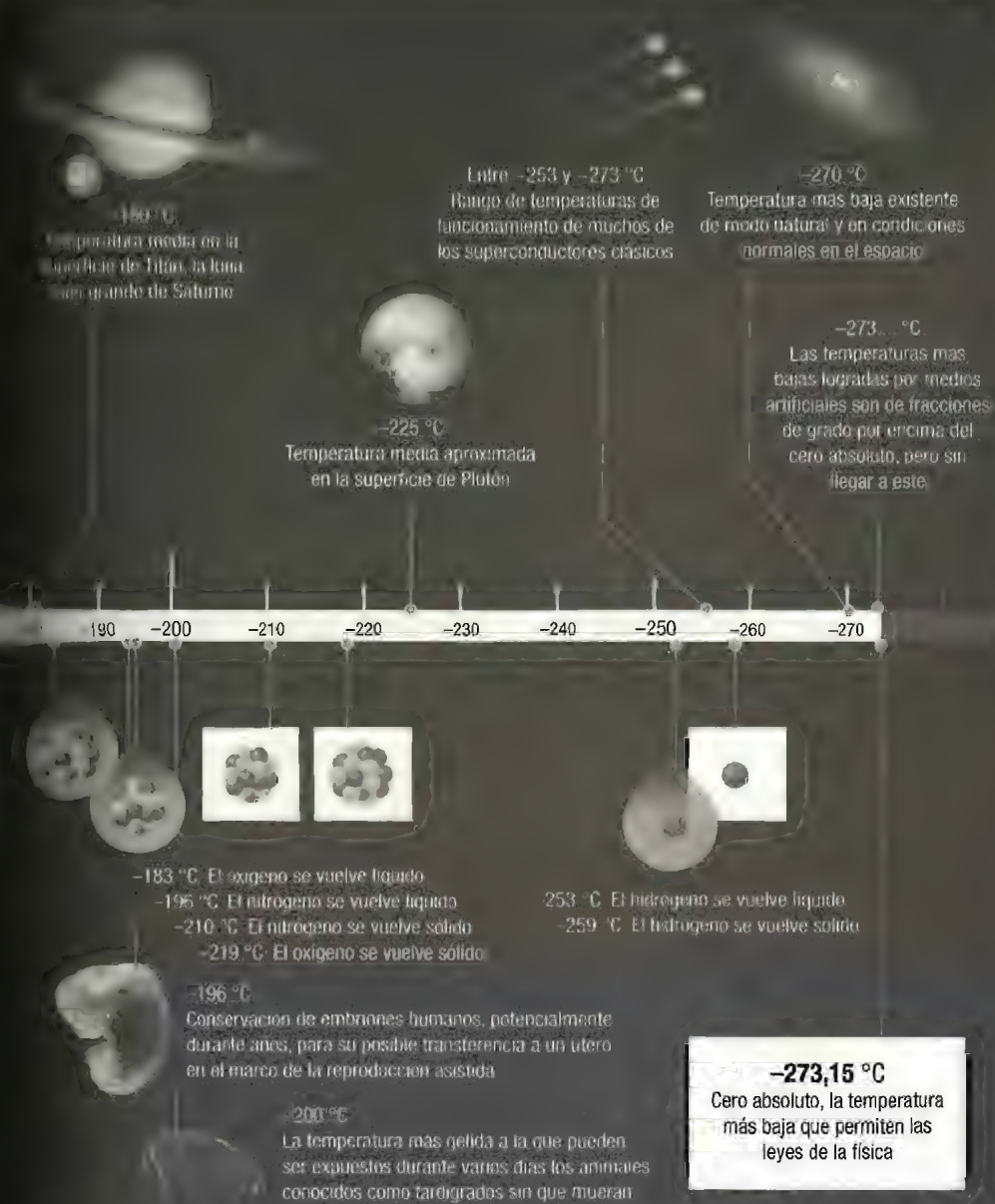
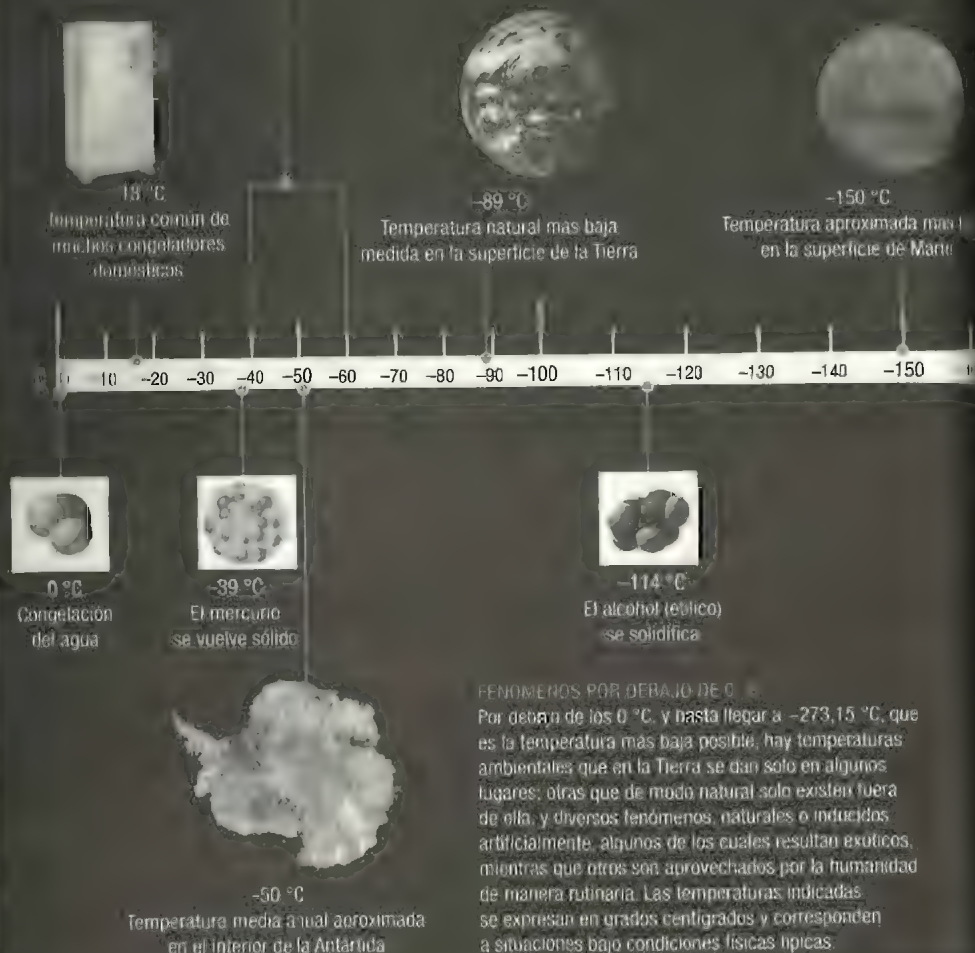
un poco por debajo del punto de congelación del agua y ligeramente por encima del de la fusión de la mantequilla. ¿Dónde encontramos las temperaturas más extremas? En hornos de cocina, que llegan hasta unos $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; en soldadores de estaño caseros, donde este metal se funde a unos $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, o en fundiciones y altos hornos donde se licuan metales como el hierro, alcanzándose fácilmente unos $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperaturas mucho más frías que las habituales las encontramos en los crudos inviernos polares, donde pueden alcanzarse con facilidad $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, como relatan desde la estación Amundsen-Scott del polo sur. ¿Es esta la temperatura más baja posible? Ni de cerca. La superficie de la Tierra, gracias en gran parte a su atmósfera, presenta una temperatura muy razonable y apta para la vida tal y como la conocemos. No es el caso de nuestra vecina la Luna, que, carente de atmósfera, se ve sometida a grandes cambios de temperatura en su superficie, yendo de unos $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando el Sol da de plano a unos $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la cara opuesta. ¡Casi 300 grados de oscilación térmica entre el día y la noche!

Enfriemos

Una vez integrada en nuestra forma de pensar la descripción atomista del mundo, uno puede buscar temperaturas más y más frías siguiendo el ejemplo del agua. Esta, líquida habitualmente (sometida a la presión de una atmósfera), por encima de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se convierte en un gas y por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ se solidifica en hielo. ¿Les ocurre lo mismo a otras sustancias? Uno de los elementos más apreciados, el oxígeno que necesitamos para respirar y que normalmente encontramos en estado gaseoso, requiere una temperatura de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ para convertirse en líquido y de $-219\text{ }^{\circ}\text{C}$ para solidificarse. Otro viejo conocido, el hidrógeno, el gas formado por los átomos más sencillos, hechos solamente por un protón y un electrón, necesita bajar a casi $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ para licuarse y $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ para solidificarse. En la imagen de las páginas siguientes se ofrece una selección de fenómenos y de temperaturas ambientales que van desde la congelación del agua hasta el frío más intenso

EL FRÍO Y EL CERO

El ser humano puede sobrevivir a la temperatura cero, pero paralizando con el descenso de la temperatura hasta el punto de que con pocas decenas de grados bajo cero o incluso menos si otras condiciones ambientales son favorables, un cadáver puede mantenerse en un estado de conservación bastante bueno durante milenios. Un ejemplo es Ötzi, la momia congelada de los Alpes.



permitido por las leyes de la física. La historia de cómo se consiguió alcanzar por medios artificiales las citadas temperaturas críticas del oxígeno y del hidrógeno, entre otras, es fascinante e involucra a un nutrido grupo de científicos de varios países.

Enfriar hasta que todo sea cuántico

Enfriar no es tarea fácil. Lo mismo da que sea un café, una habitación o un helado, en ningún caso es sencillo y en todos ellos nuestra capacidad para enfriarlos es limitada. ¿Cómo hacer descender entonces la temperatura hasta el cero absoluto? En esta empresa nos toparemos con una invitada de excepción: la física cuántica.

El problema al que nos enfrentamos es el de bajar la temperatura de un sólido, un líquido o un gas. Hemos visto en el capítulo anterior que es factible definir una escala de temperaturas y que hemos sido capaces de diseñar aparatos fiables para medirla. Así pues, ¿cómo podemos bajar la temperatura de algo? Para conseguir que un objeto disminuya su temperatura tendremos que hacer que pierda calor, que se produzca un flujo de calor de dicho objeto a otro que, probablemente, aumentará su temperatura.

Al alcance de nuestra mano tenemos algunos mecanismos y trucos que utilizamos habitualmente, como por ejemplo soplar sobre la superficie que queremos enfriar. Esto lo hacemos para no quemarnos al tomar un café, para enfriar un dedo que se nos ha chamuscado accidentalmente o para enfriar la sopa que tenemos en la cuchara. Este método es muy efectivo, lo que hace que esté muy extendido, aunque a nadie se le escapa que no parece sencillo conseguir bajar cien grados a base de soplidos.

Otra técnica a la que estamos habituados es poner en contacto el objeto a enfriar con uno que ya está más frío que el primero. Así enfriamos agua en contacto con hielo, comida en una nevera portátil en la que hemos introducido algún material frío e inclu-

no así es como la lava volcánica, que emerge a unos 1000 °C, se enfría al entrar en contacto con la superficie terrestre, el mar o el aire, todos ellos a una temperatura muchísimo más fría. También es así, aplicando hielo, como enfriamos la zona en la que hemos recibido un golpe para evitar la inflamación posterior. Esta técnica deja claro que es relativamente fácil estar a la temperatura de nuestro entorno, y más complicado alejarse de ella. Normalmente esto último requiere un trabajo, lo que a su vez precisa aporte energético. El cuerpo humano, que necesita permanecer a unos 37 °C y está sometido mayormente a ambientes de entre 0 y 25 °C, requiere aporte energético de manera continuada para poder mantener su temperatura idónea. Comer sirve, en gran medida, para luchar contra el equilibrio térmico de nuestro entorno.

Aparte de estos dos métodos, hay otra forma de enfriar que todos tenemos a nuestra disposición: el frigorífico, cuyo funcionamiento no todo el mundo conoce con detalle (véase el recuadro de la pág. 47).

HISTORIA BREVE DEL FRÍO COTIDIANO

Las dos técnicas más a mano para enfriar las hemos comentado anteriormente. La primera es poner en contacto el objeto a enfriar con otro más frío que el primero. La segunda es la ventilación que logramos, por ejemplo, al soplar, gracias a la cual retiramos átomos o moléculas rápidos de la superficie, que serán reemplazados por otros más lentos, dando como resultado un enfriamiento de la muestra. Aparte de estas, desde finales del siglo XIX disponemos de frigoríficos que son capaces de producir hielo y refrigerar nuestros alimentos. Recordemos que hasta su invención era realmente complicado comer alimentos frescos, siendo de suma importancia las salazones, salmueras y otras técnicas culinarias para conservar las carnes y pescados. No hace tanto tiempo, a principios del siglo XX, muchos hogares no disponían aún de refrigerador, por lo que dependían del suministro periódico de hielo. Es fascinante la historia del gran comercializador de este producto, Frederic Tudor, quien distribuía hielo



Arriba, bloques de hielo son cargados en un barco para su distribución comercial en 1900. Abajo, dos mujeres repartiendo hielo a principios del siglo XX, poco antes del declive definitivo de este tipo de negocio.

CULTIVO Y DISTRIBUCIÓN DE HIELO, UN NEGOCIO MUNDIAL

El control, la comercialización y la conservación del tipo de alimentos que se consumen en un país son fundamentales en su economía y desarrollo de la sociedad moderna. A principios del siglo **xx** se empezaron a comercializar los alimentos a escala de forma increíble hasta la época. Ciudades como Boston, Nueva York, Chicago y Baltimore multiplicaron ampliamente sus poblaciones en el periodo 1820-1850. Este aumento demográfico acarrió una gran demanda de productos frescos para abastecer los grandes mercados y alimentar al creciente número de habitantes de las grandes urbes que comenzaban a originarse.

La solución: los «neveros»

En aquella época, aunque se conocían formas de enfriar, todavía se estaba lejos de conseguir desarrollar frigoríficos capaces de satisfacer la creciente demanda de frío. En la mayor parte de los casos florecieron los neveros artificiales donde se guardaba y distribuía hielo llegado de zonas montañosas. En estos neveros artificiales se apilaba hielo para después poder ir utilizándolo durante el resto del año. En algunos casos datan de tiempos del Imperio romano, aunque florecieron en su mayor parte entre los siglos **xvi** y **xx**. En muchos puntos del planeta aparecieron pequeños negocios de comercio de hielo, por ejemplo, bajándolo de los Alpes o, en Rusia, transportándolo a lo largo de ríos, para poder abastecer de frío a las ciudades.

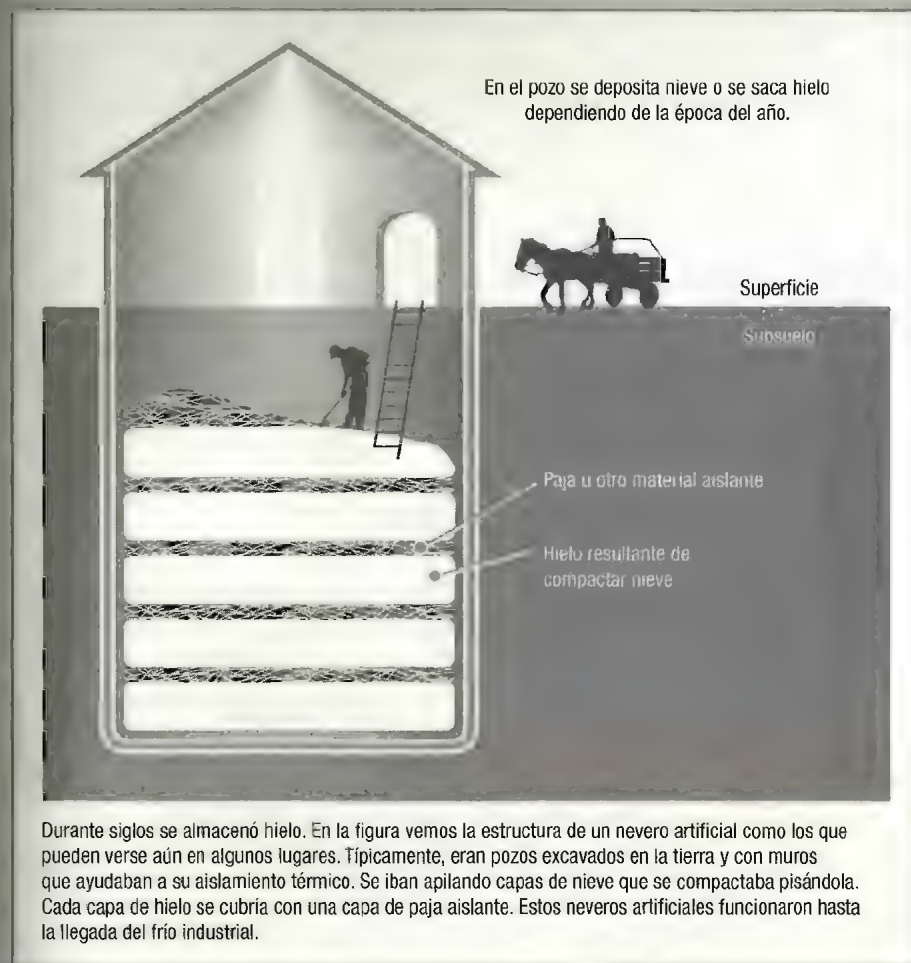
El hielo a gran escala

El sector comercial cambió notablemente con la entrada de Frederic Tudor. Conocido como el «Rey del Hielo de Boston», fundó la Tudor Ice Company, que revolucionó el negocio, pasando de ser más o menos local a convertirse en una empresa global de distribución de hielo. Tudor extraía hielo en grandes cantidades en lagos de la zona de Massachusetts y lo proporcionaba a las grandes urbes de la zona, como Nueva York y Filadelfia, ciudades con severos veranos, lo que las hacía grandes consumidoras. La distribución de hielo se realizaba mediante vagones y barcos refrigerados. Estos a su vez abrieron la posibilidad de transportar carnes y verduras desde grandes estados productores, como Illinois y Ohio, hacia las grandes ciudades. El negocio del hielo, y su distribución, se convirtieron así en catalizadores de la vida moderna. La empresa de Tudor creció sin medida, llegando a mediados del siglo **xix** a distribuir hielo de Nueva Inglaterra a sitios tan alejados como Inglaterra o Brasil, alcanzando incluso la India y Australia. Esta historia, no demasiado conocida, llevó a varias empresas, en especial la de



Frederic Tudor se convirtió en un magnate del negocio del hielo en el siglo **xix**, antes del desarrollo del frigorífico.

Frederic Tudor, la primera gran empresa comercializadora de alimentos como nunca antes, como el frío, los alimentos que otro al plato de muchos exportadores saliendo de los países. El declive del negocio y su funcionamiento tuvieron lugar en un breve espacio de tiempo. El nacimiento de la industria de la refrigeración y la construcción de fábricas de hielo sustituyeron toda la industria de distribución a larga distancia. A principios del siglo **xx** las plantas de producción artificial de hielo proliferaron, convirtiéndose cientos de fábricas en Gran Bretaña.



generado en la costa este de Estados Unidos por todo el planeta. Comenzó distribuyendo hielo en su entorno cercano y terminó cubriendo casi todo el globo en los años treinta del siglo XIX. Su

Un hombre que haya tomado sus bebidas frías por el mismo precio durante una semana jamás las aceptará ya calientes.

FREDERIC TUDOR

negocio desapareció al abarataarse el precio de los frigoríficos caseros.

El frigorífico en cualquiera de sus variantes es hoy día un elemento esencial en nuestro hogar, como comprobamos cuando se estropea y vemos echarse a perder los alimentos. Obsérvese la importancia capital

para los seres humanos que tiene ser capaces de disminuir la temperatura de los alimentos unos 30 °C, con el fin de poder congelar el pescado recién salido del mar o la carne después de la matanza. Y, sobre todo, piénsese en la tremenda asimetría que existe entre disminuir 30 °C la temperatura y aumentarla en la misma cantidad. Recordemos lo sencillo que es subirla unos 80 °C, como hacemos cada vez que hervimos agua en la cocina y lo complicado que sería para una persona normal y corriente bajarla en la misma magnitud con respecto a la ambiental en cualquier cosa.

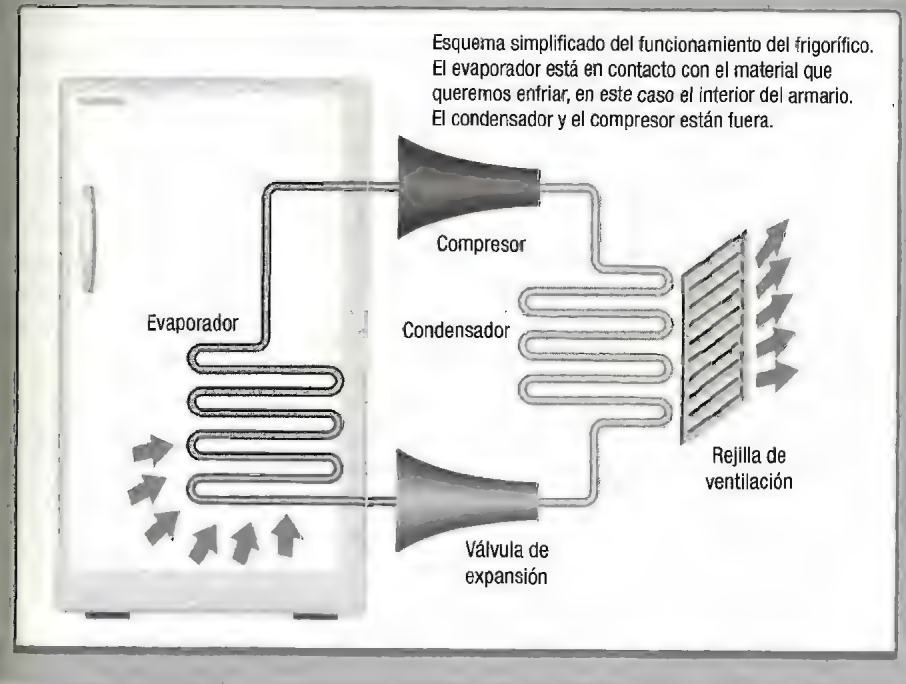
CONVIRTAMOS EL AIRE EN LÍQUIDO

Nos hemos extendido en la importancia cotidiana del frío; sigamos ahora nuestra exploración científica y volvamos a los problemas básicos. Queríamos enfriar para entender mejor cómo funciona nuestro mundo, para ver con nuestros ojos la frontera de lo más frío posible que intuyeron Amontons, Antoine Lavoisier y tantos otros y, en última instancia, para quizá demostrar que se equivocaban. La ciencia siempre ha funcionado así, a base de retos, de escepticismo acerca de los conocimientos establecidos y con la esperanza, o incluso certeza, de que al ver o entender los fenómenos siempre aparecen nuevas preguntas.

Sigamos, pues, enfriando. Los mecanismos refrigerantes parecidos a los utilizados en un frigorífico comercial permiten alcanzar fácilmente temperaturas de unos 240 K (unos -30 °C). Aún

FUNCIONAMIENTO DEL FRIGORÍFICO

Los frigoríficos, climatizadores, bombas de frío, etc., funcionan sobre un esquema más o menos similar. Normalmente consisten en una suerte de armario hecho de material aislante, que conduce poco el calor. Para enfriar el aire del interior del armario, y con él todo lo que contenga, se sigue un ciclo en el que intervienen básicamente cuatro elementos: el condensador, la válvula de expansión, el evaporador y un compresor. Entre ellos circula un refrigerante que realiza el proceso ilustrado en la figura. El refrigerante entra en el compresor en estado gaseoso, donde, gracias a la electricidad, se aumenta la presión del gas de manera que se incrementa su temperatura (recordemos que para los denominados gases ideales se cumple que la presión es proporcional a la temperatura para un volumen constante). El vapor sale del compresor y entra en el condensador, donde el gas se enfría ligeramente y se convierte en líquido a, más o menos, la temperatura alcanzada. En el proceso se cede calor al exterior, y de ahí la necesidad de la rejilla de ventilación. Justo después, el líquido pasa a través de una válvula, y tras ella la presión cae abruptamente, lo que hace que una gran proporción del líquido se evapore inmediatamente, enfriándose. Este líquido-gas, frío, se hace ahora circular por un evaporador al que se envía, por ejemplo, aire, que al contactar con el tubo por el que pasa el líquido-gas, se enfría y, por consiguiente, se reduce la temperatura del frigorífico. Por último, el refrigerante retorna al compresor, repitiéndose el ciclo.



estamos moviéndonos en temperaturas cercanas a las típicas del agua, que conforman nuestro ámbito de confort debido más que nada a que somos en gran medida agua. Por debajo de cero grados esta se solidifica, y si seguimos bajando la temperatura no observamos grandes cambios ni parece que haya mucho que aprender en ella. Hoy se sabe que lo que ocurre es que las moléculas de agua encuentran la mejor forma de ordenarse con relativa rapidez. Al enfriar más, la estructura se mantiene inalterable y van disminuyendo las vibraciones de la red.

Dejando a un lado el agua, para muchos científicos el reto consistió en licuar los gases denominados *permanentes*, que son aquellos que no vemos solidificarse de forma natural en nuestro entorno. Este es un reto de primer nivel que presupone que todo lo que observamos se comportará de modo parecido. Así, si el agua aparece como vapor, como líquido y como sólido, ¿por qué no debería ocurrir lo mismo con otras sustancias como el oxígeno que respiramos? La pregunta está bien planteada, lo que ocurre es que la razón por la cual unas sustancias se solidifican a unas temperaturas mientras que otras requieren temperaturas muy diferentes es una cuestión complicada. Es bueno tener claro en ciencia qué preguntas son relativamente fáciles y cuáles requieren un desarrollo intelectual muy elaborado. Esto último implica entender qué hace que el oxígeno y el agua sean diferentes. Hoy día se sabe que las diferencias se deben a la constitución interna de los átomos. A mediados del siglo XIX nadie tenía muy claros los motivos. Aun así, científicos de la talla de Michael Faraday, con aportaciones en múltiples campos, en especial en electromagnetismo, habían conseguido licuar la práctica totalidad de los gases que cayeron en sus manos con la excepción de seis que parecían ser particularmente reacios a ello: se trataba del oxígeno, el hidrógeno, el monóxido de carbono, el nitrógeno, el metano y el óxido nítrico. Tengamos en cuenta que en aquella época aún había varios gases nobles de la tabla periódica que no se habían descubierto, como eran el helio, el neón, el argón, el kriptón y el xenón.

El procedimiento para licuarlos era muy similar y se basaba en el *efecto Joule-Thomson*. La técnica consiste en aumentar mucho

la presión sobre el gas para posteriormente hacerlo atravesar una válvula de forma que esta disminuya abruptamente. A la salida de la válvula se produce una fuerte bajada de la temperatura del gas que hace que se lleguen a formar gotas de líquido. ¿No nos resulta familiar este proceso? Un ejemplo cotidiano que todos hemos experimentado son los aerosoles: a medida que sale el gas, el contenedor se va enfriando. El efecto enfriador de la salida de los espráis es exactamente el mismo que el utilizado para licuar los gases. Todo este procedimiento funciona bien si comenzamos a una temperatura suficientemente baja y permite descender más o menos dependiendo de la sustancia que estemos enfriando. En muchos casos para poder llegar a licuar un gas se procede en cascada: primero se licua uno fácil, después se utiliza este para enfriar un segundo gas cuya temperatura de licuefacción sea menor, y así sucesivamente. Utilizando esta técnica con ligeras variantes se puede llegar a licuar oxígeno (a unos 90 K = -183 °C) e incluso nitrógeno (a unos 77 K = -196 °C).

Aquí estamos entrando ya en el ámbito de lo muy frío. Recordemos que la temperatura más baja registrada sobre la superficie de la Tierra es de -89 °C. Con nitrógeno líquido estamos alcanzando unos 100 grados menos. En estos experimentos se consigue producir sustancias que la naturaleza solo proporciona en contadas ocasiones, y desde luego no en nuestro planeta. En el siglo XXI el nitrógeno líquido está presente en laboratorios de medio mundo, es relativamente fácil de transportar y suministra una fuente de frío fantástica para aplicaciones variadas. Una de las más recientes irrumpe en el ámbito gastronómico, puesto que algunos chefs lo están utilizando para preparar platos sorprendentes al introducir alimentos en él.

Son interesantes las demostraciones de física recreativa que se llevan a cabo con nitrógeno líquido. Una actividad típica consiste en sumergir una flor recién cortada en un bidón de esta sustancia, con lo que de inmediato se vuelve quebradiza, fracturándose en mil pedazos (véase la imagen inferior de la pág. 51). Otra consiste en introducir cientos de globos inflados con aire dentro de un recipiente de nitrógeno líquido. La temperatura es tan baja que la presión de los globos cae abruptamente permitiendo que

entren, inflados, en el recipiente. Después pueden extraerse y al contacto con el aire a temperatura ambiente vuelven a inflarse como si nada hubiera pasado. Es un espectáculo que vale la pena presenciar.

EL MUNDO DE LO MUY PEQUEÑO

En nuestro viaje hasta el cero absoluto aún nos queda un trecho importante por recorrer y es en esta región de temperaturas donde los cimientos de la física requirieron una importante revisión que duró años. El paradigma atomista conjugado con la mecánica de Newton funciona a la perfección. El esquema está claro: todo está hecho de átomos que se mueven, chocan y se agrupan. Si van rápido y chocan poco, están en estado gaseoso. Al introducirlos en un recipiente rebotan contra las paredes, ejerciendo presión. Todos los gases tienen muchas características comunes; por ejemplo, si aumentamos la presión suele aumentar la temperatura. Cada sustancia está compuesta de unos átomos o conjuntos de átomos distintos, lo cual da lugar a la variabilidad. Por tanto, cada compuesto tiene sus peculiaridades propias: algunos son sólidos a temperatura ambiente, otros gaseosos o líquidos, pero aumentando o disminuyendo la temperatura todos ellos van pasando por estos tres estados. Esto ocurre hasta temperaturas muy bajas, como la del nitrógeno líquido. A partir de aquí el paradigma se tambalea. Por debajo encontraremos sorpresas, una de ellas la necesidad de utilizar una nueva especialidad para describir los fenómenos: la física cuántica. Veamos primero someramente en qué consiste y después volvamos a la razón por la que se nos presenta al bajar la temperatura.

La física cuántica, y tras ella su formalización matemática, denominada *mecánica cuántica*, ha sido uno de los constructos teóricos más sorprendentes y complejos jamás elaborados. A esto hay que añadir que es una de las teorías científicas más sólidas que tenemos, desafiando desde hace ya más de ochenta años todos los experimentos que se han ido realizando. Vamos a delinear algunos de sus aspectos más fascinantes y singulares.



En contacto con el aire, el nitrógeno líquido comienza a evaporarse inmediatamente, como delata el vapor blanco que surge del interior de esta cámara de nitrógeno líquido tras ser abierta en un laboratorio (arriba). En la fotografía inferior se muestra lo que le ocurre a una flor al ser introducida en nitrógeno líquido: se volverá tan quebradiza que cualquier golpe la hará desmenuzarse.

La física cuántica describe el funcionamiento del mundo de lo infinitamente pequeño. Pero como «infinitamente» es una licencia literaria, precisemos: estamos hablando de tamaños inferiores a una diezmilmillonésima de metro (es decir, un ángstrom). Esto es muchísimo más pequeño que el grosor de un cabello, en torno a 0,07 mm; menor que cualquier microbio —el bacilo de Koch, causante de la tuberculosis, mide un par de millonésimas de metro—, y menor que los virus, cuyo tamaño ronda los cientos de nanómetros (unidad que equivale a una milmillonésima de metro).

En ese mundo de lo tremendamente pequeño hay algunos personajes y, mucho, muchísimo, espacio vacío. Los primeros son, por ejemplo, los protones, bolas (aunque quizá se parezcan más a tortitas que a esferas) con un diámetro aproximado de 10^{-16} m. Esto es, ni más ni menos, 100 000 millones de veces más pequeño que el grosor de un pelo. Además de los protones también hay neutrones, de tamaño parecido. Varios protones y neutrones conforman el núcleo atómico; a su alrededor, a una distancia unas cien mil veces mayor que el tamaño del propio núcleo, tenemos los electrones, una proporción como si el núcleo tuviera el ancho de una uña y los electrones estuvieran en las gradas de un campo de fútbol. Esta distancia es la que define la extensión del átomo, que está en torno al ángstrom. El resto, todo el espacio entre el núcleo y los electrones, está esencialmente vacío. De hecho, en 1909, cuando Ernest Rutherford y su equipo hicieron su célebre experimento bombardeando una lámina de oro con partículas alfa, lo que observaron fue que aquellas con suficiente energía atravesaban el oro sin inmutarse. Como si no hubiera nada, pasaban sin modificar prácticamente su trayectoria. Para sorpresa de todos, algunas de ellas, muy, muy pocas, en lugar de atravesarlo, rebotaban bruscamente, como si se hubieran topado con una pared. Estos eventos eran tan extraños que el propio Rutherford escribió que: «es casi tan increíble como si dispararas un proyectil de 15 pulgadas contra un pañuelo de papel y acabara rebotando y golpeándote». Rutherford se hizo una composición de lugar muy razonable un par de años después: los átomos constaban de un centro pesado, el núcleo, después había mucho espacio vacío, y más allá teníamos a los electrones

orbitando. Por este motivo la mayoría de las partículas alfa atravesaban la lámina y solo rebotaban aquellas que «casualmente» chocaban con un núcleo de un átomo. A escalas algo mayores, aparecen moléculas, grupos de átomos de muy diversos tamaños, y después estructuras más o menos complejas, como proteínas, ácidos nucleicos, virus, células, etcétera.

En el mundo cuántico, las partículas que encontramos son todas idénticas, esto es, dos electrones son completamente iguales excepto por su giro intrínseco, el espín (nada más diremos de él aunque juegue un papel relevante en, por ejemplo, la resonancia magnética nuclear, convertida hoy en una técnica de diagnóstico corriente). Aparte de eso, nada los distingue, no tienen estructura interna, lo que hace que no haya forma de diferenciarlos. Piense el lector que esta afirmación es muy osada: imagine dos cosas, cualesquiera, que sean completamente iguales. Es difícil de imaginar. Es más sencillo pensar que aún no hemos llegado a poder ver las diferencias. Es más o menos como cuando miramos el firmamento, donde muchas de las estrellas nos parecen idénticas, aunque ahora sepamos que, si nos vamos acercando, cada una de ellas será completamente diferente.

Estas partículas se atraen y repelen dependiendo de sus cargas eléctricas, negativas para los electrones y positivas en el caso de los protones. Las partículas de igual carga eléctrica se repelen y las de cargas opuestas se atraen. Los neutrones, sin carga, apenas interactúan con otras partículas a menos que estén muy próximas. De hecho, si son protones y neutrones se suma a la fiesta una fuerza con una extraordinaria capacidad de atracción denominada *fuerza fuerte* (o *interacción fuerte*), tan intensa que consigue vencer la enorme repulsión electrostática entre protones y agruparlos junto a un número similar de neutrones en regiones del espacio muy reducidas para conformar el núcleo atómico.

El mundo cuántico

A estas distancias, prácticamente todo es cuántico. ¿Qué significa esta afirmación? Un conjunto de cosas: la primera es que la

energía de una de las partículas sobre las que estamos hablando, el electrón, no es cualquiera, sino que solamente puede tomar una serie discreta de valores. Esto contrasta con nuestro mundo ordinario, en el que todos los objetos pueden tener todas las energías posibles. Así, un coche puede circular a cualquier valor de la velocidad entre 0 y 100 km/h. Desconfiaríamos, y con razón, si en el concesionario nos prometieran que nuestro coche solo puede circular a determinadas velocidades, por ejemplo a 10 km/h, 20 km/h y 100 km/h. Si así fuera, ¿cómo haríamos para pasar de una a otra velocidad sin atravesar las intermedias? Si se tratara de un electrón, no todas serían posibles.

Esto último no parece muy trascendental, sin embargo implica, entre otras cosas, que la luz que emiten los átomos nos llega distribuida en colores determinados que perciben nuestros ojos. Así, una lámpara de sodio, muy utilizada en alumbrado urbano hasta hace muy poco, emite primordialmente en un color amarillento que corresponde a una longitud de onda de 589 nanómetros. La relación entre longitud de onda y frecuencia de una onda viene dada por la velocidad de la onda. De este modo, para ondas de luz, tenemos que la longitud de onda multiplicada por la frecuencia es la velocidad de la luz. Esto está íntimamente relacionado con la estructura interna de los átomos de sodio y, más precisamente, con las energías que pueden tener los electrones que orbitan al núcleo. En cierto modo, simplificando mucho la explicación, es como si cada átomo fuera un campo de fútbol: el balón situado en el centro del campo sería el núcleo; los electrones serían el público y podrían estar en cualquier punto de la gradería. Al bajar de una grada superior a otra inferior, los electrones tienen un exceso de energía (ahora están más cerca del suelo, con menos energía potencial) que pueden emitir en forma de luz de una frecuencia precisa dependiendo de dicho exceso. Esto hace que cada gas formado por un tipo de átomo diferente, en nuestro símil un campo de fútbol de una ciudad distinta, con las gradas un poco más separadas entre sí, emita luz en una serie precisa de frecuencias, de colores, muy característica y que sirve para identificarlos inequívocamente. Este ejemplo proporciona una imagen razonable pero

no da para mucho más; para hilar más fino harían falta algunas ecuaciones.

El hecho de que no todos los valores de la energía u otras magnitudes sean posibles sino que solo unos cuantos puedan existir es lo que da el nombre a la teoría cuántica. En matemáticas sería parecido a pasar de utilizar todos los números reales, donde tenemos números como el 3, el número pi, el 30048,34 y cualquier otro que pueda pensar el lector, a un conjunto como el de los números naturales, que solo tiene el 1, el 2, etc.

Al mismo tiempo, la teoría cuántica propone, en su acepción habitual, una descripción probabilística de los fenómenos y no determinista. Por ejemplo, de un electrón no podemos saber dónde está exactamente y a qué velocidad se mueve en cada instante de tiempo, aunque sí podemos predecir la probabilidad de encontrarlo en una determinada región del espacio. Esto se conoce como *principio de incertidumbre de Heisenberg* y representa uno de los pilares conceptuales de la mecánica cuántica. El abandono del determinismo, inherente a la descripción de la naturaleza que emana de las leyes de Newton, ha traído de cabeza a múltiples filósofos, físicos y pensadores en general desde que se postulara la física cuántica a principios del siglo xx por eminencias de la talla de Niels Bohr, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg. A muchos, como a Einstein, les repugnaba la idea de no poder predecir con exactitud la posición y velocidad de cualquier objeto a partir de un conocimiento preciso previo. Durante el siglo xx, además de la mecánica cuántica se desarrolló también la *teoría del caos*, que nos enseña que no siempre una descripción determinista del mundo natural nos garantiza una precisión suficiente del devenir de los acontecimientos. El ejemplo más notable y sencillo que ilustra esto sería el de la pelota sobre el pico de una montaña (una montaña que acabe en pico, ideal de montaña en los libros infantiles): es imposible predecir en qué dirección caerá, siquiera de forma aproximada, ya que pequeñas, mínimas, ínfimas, infinitesimales perturbaciones harán que la bola se decante por una u otra dirección. Será imposible repetir el experimento y obtener el mismo resultado. Así pues, en ese sentido el siglo xx fue particularmente duro para

la comunidad científica, que se vio forzada a comenzar a vivir y lidiar de manera habitual con el azar, instalado ya para siempre en nuestra comprensión del mundo en que vivimos.

Aparte de decir adiós al determinismo y de tener las energías, y cualquier otra propiedad susceptible de ser medida, cuantizadas en valores precisos, la mecánica cuántica nos dice que ninguna partícula, objeto, cosa, etc., confinada en una región del espacio puede tener energía nula. Esto está directamente relacionado con el hecho de no poder saber con precisión la posición y velocidad en el mismo instante, ya que si la energía fuera exactamente cero, la posición y velocidad podríamos conocerlas con total precisión. Así que nada de tener partículas en reposo total. Pero ¿no era esto lo que pretendíamos al bajar la temperatura en busca del cero absoluto?

En nuestro intento por hacer descender la temperatura, que se traduce, como hemos explicado, en conseguir que los átomos dejen de moverse, llegará un momento en que nos tocaremos con esta característica de la mecánica cuántica. A saber, si los átomos dejasen de moverse tendrían una energía igual a cero; sin embargo la mecánica cuántica imposibilita tener una energía estrictamente igual a cero.

Primeras joyas cuánticas: superfluidez y superconductividad

Habíamos dejado la temperatura en los 183 grados bajo cero necesarios para licuar el oxígeno. Aún lejos de los $-273,15$ grados del cero absoluto. El siguiente paso nos llevará realmente cerca, hasta los 4 K, esto es, 4 grados por encima del cero absoluto. El gas en cuestión es ni más ni menos que el helio, gas que fue descubierto por astrónomos. Esto último no es habitual, parecería más normal que siendo un gas fuera descubierto por químicos o físicos. No fue el caso, pues es tan ligero que si se deja libre en la superficie de la Tierra no es atrapado por la atmósfera, por lo que no se encuentra de manera natural en la superficie del planeta. El astrónomo francés Pierre Jules Janssen, al realizar una observación del Sol durante un eclipse, en 1868,

detectó en su espectro una línea amarilla cuya longitud de onda no se había observado antes. Como ocurre tantas veces, un descubrimiento relevante pasó desapercibido: incorrectamente se atribuyó al sodio. Norman Lockyer la midió el mismo año y la asoció correctamente a un elemento desconocido presente en el Sol y no observado hasta la fecha en la Tierra. Lo nombró con la palabra griega para el Sol, Helios. En la última década del siglo XIX se detectó su presencia en la Tierra, primero en la lava del Vesubio (tarea que realizó el físico italiano Luigi Palmieri) y más tarde se logró producir a partir de un mineral. Aun no encontrándose en la superficie sí que existen bolsas de helio en el interior del planeta; de hecho Estados Unidos descubrió grandes depósitos que ha explotado comercialmente durante todo el siglo XX, siendo el mayor productor y exportador.

Poco después de su descubrimiento, el helio entró en el juego del frío y de la mecánica cuántica. Lord Rutherford consiguió demostrar en 1907 que las partículas alfa que algunos núcleos emiten y que utilizó para bombardear oro descubriendo la existencia del núcleo atómico, eran núcleos de helio, formados por dos protones. Era pues el segundo elemento de la tabla periódica. Un año después, Heike Kamerlingh Onnes de la Universidad de Leiden, en los Países Bajos, se propuso licuar el helio en su laboratorio. Y lo consiguió. En 1908, utilizando técnicas combinadas basadas en el efecto Joule-Thomson, logró licuar el helio-4, que tiene dos protones, por ser helio, y dos neutrones en el núcleo. Hay otro isótopo del helio, el helio-3, que tiene solo un neutrón (los isótopos son átomos de un mismo elemento cuyos núcleos tienen, por tanto, el mismo número de protones pero diferente número de neutrones). La temperatura que necesitó fue de 4,2 K, aunque llegó a disminuirla a nada menos que 0,9 K en su intento por conseguir solidificarlo.

Lo que el profesor no sabía es que al acercarnos a la licuefacción del helio aparecen dos fenómenos íntimamente relacionados cuya explicación se hizo esperar casi cuatro décadas desde

Al conocimiento a través de la medición.

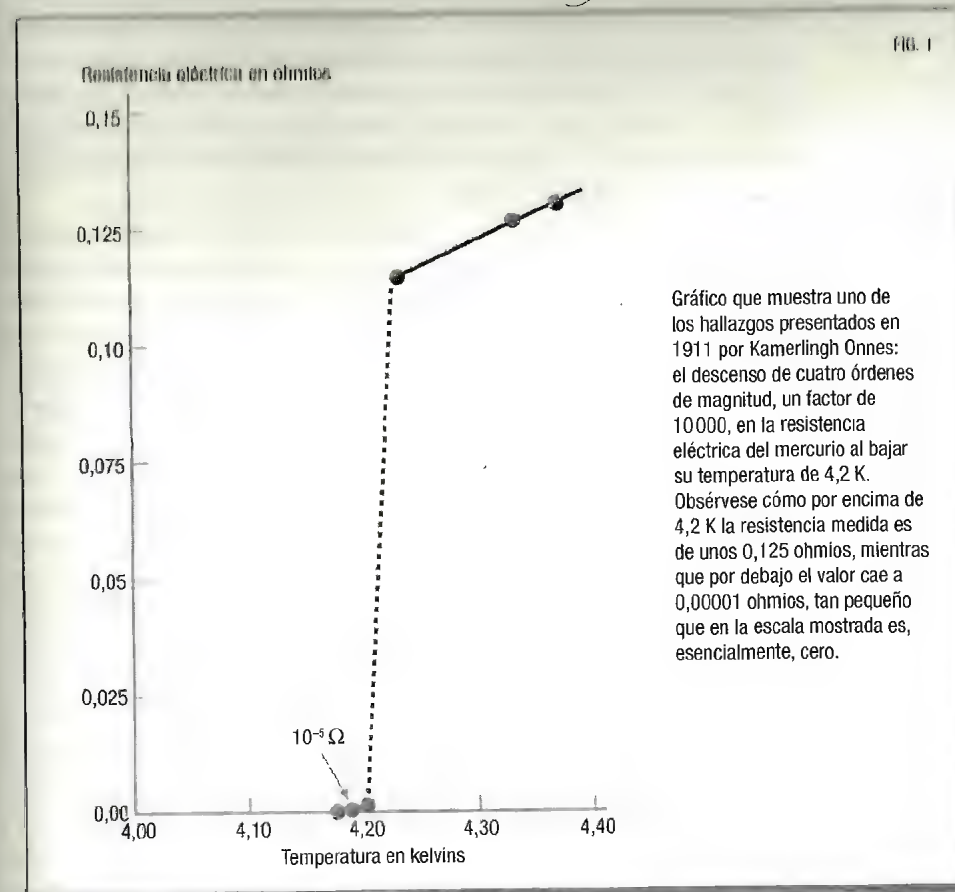
HEIKE KAMERLINGH ONNES

su observación experimental e involucra directamente la mecánica cuántica: la *superfluidez* y la *superconductividad*.

La superconductividad fue descrita por el propio Kamerlingh Onnes. En un artículo de 1911, continuación de otros realizados por él mismo, describía una abrupta caída de la resistencia del mercurio a la corriente eléctrica al bajar de una temperatura determinada. En la figura 1, podemos ver cómo mostraba el profesor su descubrimiento. En el eje vertical tenemos la resistencia en ohmios, la unidad de medida habitual, y en el eje de las abscisas se representa la temperatura en la escala Kelvin. Al bajar la temperatura de 4,4 K a 4,3 K, la resistencia desciende de forma suave y lineal, como una línea recta. Al bajar de 4,2 K se observa una disminución de la resistencia en un factor ¡nada menos que de 10 000! Es fácil imaginar la excitación que debió sentir el científico al medir dicho valor. Podemos estar seguros de que durante un tiempo tuvo que buscar una posible fuente de error más o menos trivial que fuera la responsable de un cambio tan abrupto. No es muy normal toparse con cambios tan bruscos de una magnitud con la relevancia de la resistencia eléctrica. Piense el lector que sin resistencia eléctrica podríamos tener líneas de corriente eléctrica sin pérdidas, nuestros ordenadores no se calentarían, y nuestros dispositivos serían muchísimo más eficientes y amigables con el medio ambiente, entre otras ventajas.

El descubrimiento del profesor Kamerlingh Onnes fue solo el principio. En su caso, la temperatura a la que se producía el descenso radical de la resistencia era realmente muy baja. Prácticamente desde entonces no ha cesado la búsqueda de materiales que tengan temperaturas de transición más altas y que permitan desarrollar aplicaciones comerciales baratas de dicho fenómeno. En los últimos tiempos se han descubierto infinidad de compuestos superconductores, la mayoría con temperaturas críticas por debajo de los 30 K.

La razón por la cual algunos materiales se convierten en superconductores al bajar la temperatura es complicada. La teoría de la superconductividad tardó años en aparecer, y les valió el premio Nobel en 1972 a sus autores, John Bardeen, Leon Neil



Cooper y John Robert Schrieffer, por su trabajo publicado en el año 1957. La teoría que desarrollaron, denominada normalmente como BCS siguiendo las iniciales de los autores, es bastante ingeniosa. Conjetura que, por debajo de una determinada temperatura, los electrones del metal, que se repelen entre ellos y circulan por el material dando lugar a la corriente eléctrica, pasan a juntarse de dos en dos ayudados por las vibraciones de los átomos que lo constituyen. Estas vibraciones hacen que los electrones se atraigan levemente, haciendo que se formen parejas de ellos. Salvando las distancias, el mecanismo tiene cierto

parecido con el que observó Christiaan Huygens en el siglo XVII en su descripción de la sincronización de relojes. Dos péndulos anclados en el mismo soporte que inicialmente realizan un movimiento oscilatorio con diferente frecuencia, acaban sincronizándose gracias a las vibraciones transmitidas a través del citado soporte. Los péndulos jugarían el papel de los electrones.

El gas formado por parejas de electrones, denominados *pares de Cooper*, tiene un comportamiento completamente diferente desde el punto de vista cuántico. Como explicaremos más adelante, son bosones en lugar de fermiones. Esta transición, de tener los electrones individuales fluyendo como de costumbre, con su resistencia característica, a tener una suerte de *condensado de Bose-Einstein* (que explicaremos en el capítulo 3), es la que da lugar a la caída de la resistencia eléctrica.

El fenómeno de la superfluidez está íntimamente relacionado con el de la superconductividad aunque durante años no fue descubierto. Como explicamos a principios del capítulo, el profesor Kamerlingh Onnes licuó helio en 1908. Más tarde, en 1924, midió con precisión su densidad y observó que, a medida que la temperatura disminuye, la densidad pasa por un máximo abrupto cuando aquella alcanza los 2,2 K. Otros investigadores, algo más tarde, describieron lo que le ocurre al helio a esa temperatura como una *transición de fase*. Esto indica que algo estructural está ocurriendo en el helio. Tuvieron que pasar diez años hasta que en 1937 el físico ruso Piotr Kapitsa midió el flujo de fluido al pasar entre dos discos. Para su sorpresa, había un gran cambio en la forma de fluir dependiendo de si la temperatura del mismo estaba por encima o por debajo de la temperatura de la transición de fase. Por debajo de dicha temperatura la fluidez era tal que Kapitsa se apresuró a denominarla superfluidez, en analogía a la palabra superconductividad utilizada años antes por Kamerlingh Onnes. Coetáneos de Kapitsa, Allen y Misener de la Universidad de Toronto estudiaron el mismo fluido notando una casi total ausencia de viscosidad por debajo de la temperatura de transición. Su trabajo y el de Kapitsa se publicaron en el mismo número de la revista *Nature*. Kapitsa recibió el premio Nobel en 1978 por sus descubrimientos. Casualmente se le concedió el

mismo año a Arno Penzias y Robert Wilson por el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas.

TÉCNICAS DE ENFRIAMIENTO CON LUZ

Como ya hemos descrito, enfriando mediante técnicas conocidas en los siglos XVIII y XIX, que son variaciones del efecto Joule-Thomson, se pudo llegar con gran pericia experimental a licuar el helio. Con esto se consiguió bajar a temperaturas de unos 2 K. Para algunos, este podría ser el final de la carrera por enfriar, pero para otros la carrera ha continuado y ahora estamos a un paso de demostrar experimentalmente que el cero absoluto es en verdad tal, y que no se puede reducir más la temperatura. Así, el objetivo será ahora ir disminuyendo la energía cinética, la que tiene un objeto por estar en movimiento, de forma que vayamos acercando el material al cero absoluto. Hasta aquel momento, el mundo de las temperaturas bajas y los métodos para reducirla recaían en físicos que estudiaban los materiales. Para poder reducirla aún más, hicieron falta varios avances, entre los que cabe destacar la entrada en escena de los físicos atómicos y los ópticos.

Imaginemos que tenemos nuestro gas original bastante frío, lo más frío posible gracias a los métodos desarrollados hasta el siglo XIX. Este gas estará pues compuesto de átomos moviéndose por el contenedor a velocidades relativamente pequeñas, de acuerdo con la temperatura del gas que es ya muy baja. Nuestro objetivo es reducir aún más la velocidad de los átomos, y consecuentemente la temperatura del gas. Curiosamente esto podemos conseguirlo a base de iluminar con luz láser el gas ultrafrío. Y decimos curiosamente porque lo más natural es que si lo iluminamos le estemos transmitiendo energía, lo que haría que los átomos se movieran más rápido, proporcionando el efecto contrario al deseado. De hecho esto último es lo que les ocurre a las colas de los cometas. La presión que ejerce la luz solar las empuja a esconderse del Sol.

En el año 1975, dos equipos de investigación propusieron métodos para decelerar átomos mediante luz láser. Años más tar-

de, en 1997, los físicos experimentales Steven Chu y William D. Phillips y el físico teórico Claude Cohen-Tannoudji recibieron el premio Nobel por el desarrollo de los métodos para enfriar y atrapar átomos mediante haces de luz láser. El mecanismo empleado es interesante y tiene un amplio margen para aminorar la velocidad de los átomos de los gases. De hecho, a la temperatura de condensación del nitrógeno las moléculas aún se mueven a unos 150 m/s. Las de helio a 4 K viajan a la nada desdeñable velocidad de 90 m/s.

Frenando los átomos a golpes de láser

Pensemos en un solo átomo del que queremos que vaya cada vez más lento. Si lo iluminamos con un láser, dirigido por ejemplo de izquierda a derecha, básicamente le estaremos dando un golpe que hará que el átomo se mueva más rápido hacia la derecha. Lo divertido es lo siguiente. La luz láser, uno de los grandes descubrimientos del siglo xx, la podemos describir como un conjunto de «partículas de luz», fotones, cada uno de ellos con exactamente la misma energía, que es directamente proporcional a la frecuencia de la luz. Es decir, el haz láser verdoso del típico puntero que podemos adquirir por poco dinero, puede ser imaginado como un montón de fotones de color verde. Así pues, por ahora tenemos nuestra luz láser como un grupo de fotones con la misma energía o frecuencia, y por otro lado tenemos el átomo.

Para que un átomo encaje el golpe de una de las partículas de luz del láser, la energía de una de estas partículas tiene que ser igual a una de las diferencias energéticas entre las órbitas electrónicas. Es decir, el láser tiene que tener una energía precisa que haga que un electrón pase de una órbita posible a otra también permitida. Como las energías de las órbitas no son cualesquiera sino que están cuantizadas, el átomo solo podrá absorber energías muy precisas. ¿Qué ocurre si iluminamos con un láser cuya energía no encaja con ninguna de las diferencias de energía de los electrones? En este caso el átomo no notará el láser

y este lo atravesará sin inmutarse. El átomo será transparente a él. Este fenómeno de la absorción selectiva es omnipresente en física y se conoce como *fenómeno de resonancia*. De hecho estamos mucho más acostumbrados a él de lo que parece. Por ejemplo, ¿qué hacemos para escuchar la radio del coche? En primer lugar, cada emisora, mediante una antena, envía ondas de radio por doquier. Cada una utiliza una frecuencia, esto es, cada emisora envía ondas electromagnéticas de una energía determinada. Nuestro receptor, la radio del coche en este caso, tiene un circuito eléctrico cuyas características pueden variarse para poder modificar su frecuencia propia. Esto último sería el equivalente a la diferencia de energía entre dos órbitas electrónicas en el átomo. Si la frecuencia propia es similar a la de la emisora que buscamos, tendremos un efecto resonante: el receptor dejará de ser transparente a esta frecuencia y comenzará a encajar «golpes» de las ondas enviadas por el emisor. Otro ejemplo clásico de resonancia es el funcionamiento de un columpio. En él la energía está directamente relacionada con la máxima altura a la que el niño consigue elevarse en cada oscilación. Si el niño quiere aumentar la energía puede hacerlo convenciendo a su madre de que le dé empujones con una frecuencia determinada. Si la frecuencia de estos es la apropiada (se los da justo cada vez en que comienza a alejarse de ella), esta frecuencia estará en concordancia con la del columpio, y a cada oscilación el niño adquirirá más y más energía. Si por el contrario la frecuencia de los empujones de la madre no es la apropiada (se los da cuando se está acercando a ella), no tendremos efecto resonante y lo más probable es que el columpio acabe deteniéndose completamente después de un par de oscilaciones.

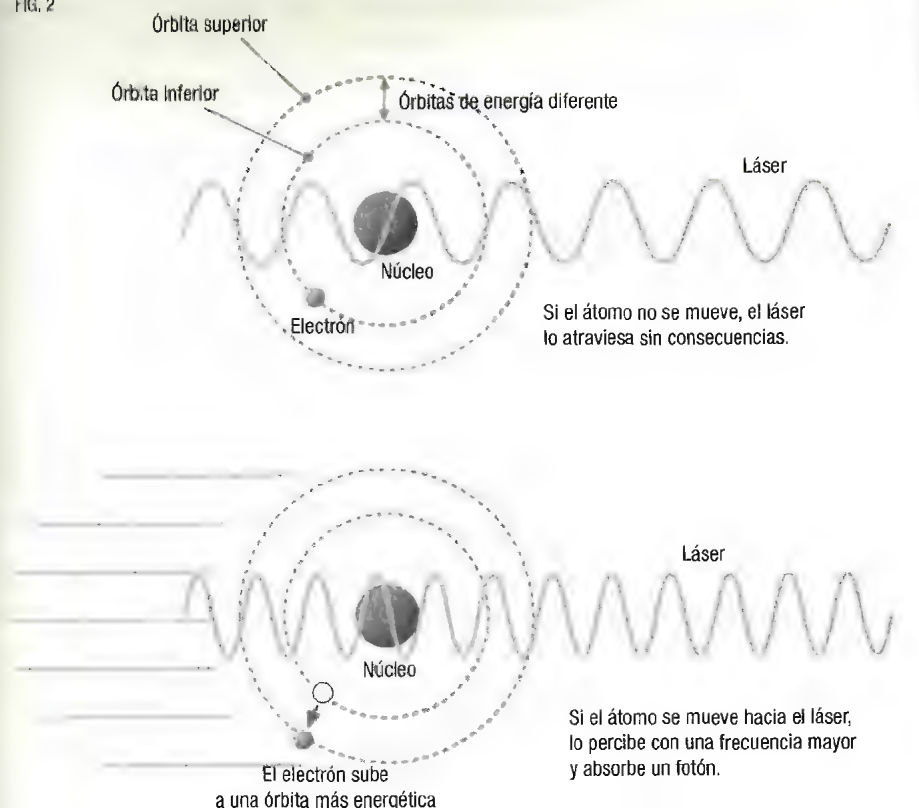
Resumamos: por un lado tenemos átomos en movimiento, cuya estructura interna es sencilla y puede ganar energías precisas subiendo electrones de una órbita a otra; por otro lado, el láser, con fotones de una energía determinada. El tercer elemento que necesitamos es el denominado *efecto Doppler*, un fenómeno notable que hoy día tiene múltiples aplicaciones: por mentar una destacada, se utiliza en medicina para poder determinar la velocidad a la que fluye la sangre por los vasos sanguíneos. ¿En

qué consiste? La idea es sencilla: supongamos que tenemos una fuente de ondas, por ejemplo un niño dando golpes con un palo en un estanque de manera regular, con una frecuencia determinada, una onda por segundo. Si nos acercamos a la fuente, es decir, si vamos avanzando en la dirección de la fuente de ondas, entonces la frecuencia aumentará. Si por el contrario nos alejamos de la fuente, la frecuencia disminuirá. Esto se puede intuir con facilidad, ya que al acercarnos iremos encontrándonos antes con las olas que si nos alejamos. Este efecto aparece en cualquier fenómeno ondulatorio independientemente de la naturaleza de la onda. Así, en ondas sonoras da lugar a que si escuchamos una ambulancia hacer sonar la sirena mientras se acerca a nosotros, oiremos el pitido bastante más agudo que si lo hace mientras se aleja. En ondas electromagnéticas da lugar a efectos fascinantes y de gran importancia en astronomía. Estrellas o galaxias que se están alejando de nosotros son vistas ligeramente más rojas que las que se acercan, que se observan más azules. Esto se conoce en ese campo de investigación como *desviación al rojo* o al azul, y es fundamental para determinar que el universo se está expandiendo.

Veamos ahora cómo enfriar con láseres nuestros átomos ya bastante fríos. Para ello, proyectemos de derecha a izquierda un láser cuyos fotones tengan una energía o frecuencia ligeramente inferior a la de una de las diferencias de energía entre órbitas. ¿Qué ocurrirá? Si el átomo se mueve apropiadamente de izquierda a derecha, debido al efecto Doppler percibirá una frecuencia ligeramente superior, lo que hará que empiece a recibir golpes de los fotones si se mueve en esa dirección (véase la situación inferior en la figura 2). Si se mueve de derecha a izquierda o está detenido no le ocurrirá nada (véase la situación superior). Por otra parte, mientras que cuando el átomo encaja un golpe lo hace en una dirección determinada, cuando se desexcita, esto es, cuando el electrón que había subido de órbita vuelve a caer a la anterior, de menos energía, lo hace enviando una partícula de luz en una dirección completamente arbitraria. El efecto neto es pues que, si el átomo iba hacia la derecha, entre que le golpea el fotón y que luego se desexcita tenemos que se mueve menos

hacia esa dirección. Si ahora agregamos otro láser de izquierda a derecha, otro de arriba abajo y otro en la dirección que falta, tendremos que los átomos irán perdiendo velocidad, debido a los golpes con los láseres, hagan lo que hagan.

FIG. 2



Concepto de enfriamiento por láser. Los electrones tienen diversas órbitas, cada una a energía diferente. El átomo solo puede absorber luz si esta tiene una energía igual a la diferencia de energía entre dos órbitas. Consideremos un átomo en reposo, en la parte de arriba de la figura. Si el láser tiene una frecuencia menor de la necesaria, como en esa parte superior del dibujo, pasa de largo sin chocar contra el átomo. Si por el contrario el átomo se mueve hacia el láser, como en la situación inferior de la figura, percibirá este con una frecuencia mayor debido al efecto Doppler (percibirá más ondulaciones en el mismo espacio). Si la frecuencia es la adecuada y todo está bien calibrado, a una velocidad determinada coincidirá la energía del láser con una transición del átomo. En ese caso, ilustrado en la situación inferior de la figura, un electrón será excitado y el átomo encajará el golpe recibido por el láser. El resultado final es que el átomo se frena en esa dirección.

Pierden velocidad y, por tanto, se enfrían. A esta técnica se la denomina *melaza óptica*, ya que el efecto combinado de los láseres que van chocando con los átomos que intentan escapar es que estos se muevan lentamente, como si se tratara de hormigas caminando por melaza o usted mismo por un barrizal. Sorprendentemente, esta técnica permitió bajar la temperatura del gas muchísimo más de lo que se pensaba, posibilitando llegar a temperaturas de decenas de microkelvins, esto es, diezmillonésimas de grado por encima del cero absoluto.

El condensado de Bose-Einstein

En varios laboratorios repartidos por el mundo se han producido en los últimos veinte años gases a temperaturas del orden de nanokelvins. Los átomos que componen esos gases bailan al ritmo más suave posible, todos al unísono, siguiendo un libreto escrito por Satyendra Nath Bose y Albert Einstein cien años antes.

Una gran parte de nuestro conocimiento sobre la temperatura y el calor procede de los estudios y experimentos realizados en los siglos XVIII y XIX que ya hemos comentado. En estos se intentaban definir conceptos como calor, temperatura, energía, y se realizaron gracias a la pericia de los propios científicos, ayudados por artesanos, que idearon y fabricaron múltiples artilugios. Entre ellos destacan termómetros de gas, de líquidos como el mercurio y máquinas de todo tipo, desde engranajes a cañones. Con mayor o menor habilidad, se intentaba aislar al máximo el aspecto que se quería estudiar, de forma que se pusieran de manifiesto las relaciones entre las distintas magnitudes que podían medirse. Un ejemplo claro es el de Guillaume Amontons, descrito en el capítulo 1. Su mayor preocupación fue conseguir un diseño que mantuviera el volumen y la cantidad de gas (su masa) constantes, de modo que las únicas cosas que variaran fueran la presión y la temperatura.

Esta ha sido habitualmente la estrategia para avanzar en nuestro conocimiento del mundo físico. Aislar lo relevante y caracterizarlo con el mínimo de magnitudes, variándolas una a una. Lo notable del caso que nos atañe es que, mediante mediciones

realizadas en objetos cotidianos, a temperaturas más o menos habituales, se conjeturó la existencia de un valor mínimo posible de temperatura. Este mínimo predicho por Amontons aparecía al extrapolar el conocimiento sobre volúmenes y temperaturas habituales a regiones extremadamente bajas de temperatura. Lo que no podía predecir Amontons es que en el camino hacia las temperaturas cercanas al cero absoluto nuestros conceptos más básicos e intuitivos, como son la definición de la posición de un objeto, el lugar preciso en el que se encuentra, o cuán rápido se desplaza, requerirían una profunda revisión.

Como ya hemos visto, tras innumerables esfuerzos y vicisitudes que duraron varios siglos, se consiguió licuar la gran mayoría de los gases, alcanzando temperaturas de unos pocos grados en la escala absoluta desarrollada por lord Kelvin. Este camino lleno de sorpresas que hemos ido desgranando llevó a descubrir propiedades nunca imaginadas, como la superfluidez o la superconductividad. Ambas resultaron ser dos caras de la misma moneda y ponen de manifiesto la naturaleza cuántica de lo tremendamente pequeño a escalas mucho mayores que las del átomo.

Disminuir la temperatura hasta límites insospechados trajo otro descubrimiento fantástico. Al enfriar algunos gases, en lugar de licuarse o solidificarse, los átomos que los componen pasan a formar uno de los estados de la materia más fascinantes: el *condensado de Bose-Einstein*.

BOSONES Y FERMIONES

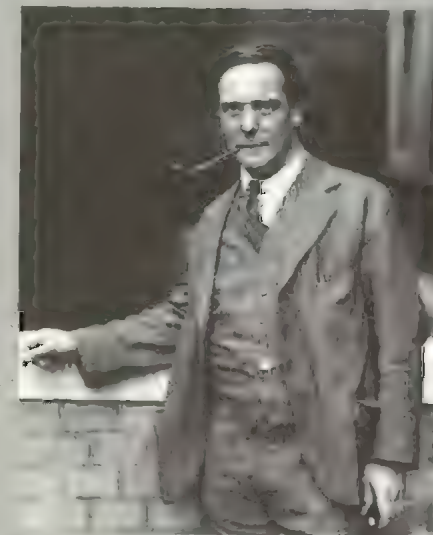
El condensado de Bose-Einstein, BEC según sus siglas en inglés, es un estado de la materia cuya mera existencia está íntimamente relacionada con la física cuántica. Como ya explicamos brevemente, el mundo de lo muy pequeño, donde se mueven los átomos, es en esencia diferente de nuestro entorno cotidiano. Entender este mundo requirió el desarrollo de una disciplina de la física, la física cuántica, que afectó rápidamente a la química y que hoy tiene ramas que abarcan desde la bio-

EL DESCUBRIMIENTO DE LA SUPERFLUIDEZ

En el año 1905 se produjo el primer descubrimiento de Heike Kamerlingh Onnes a partir de un gas. No era, sin embargo, la primera vez que se habían observado, aunque sí la vez a que no habían demostrado la forma condensada. Poco después, al licuar el helio, Heike Kamerlingh Onnes descubrió la superconductividad. Lo que por entonces era una propiedad fascinante del helio a esas temperaturas, la superfluidez. Hubieron de pasar más de veinte años para que dos grupos de investigadores reportaran resultados firmes mostrando que el helio-4 presentaba una transición clara a un estado en el que fluía de manera particularmente anómala al bajar la temperatura por debajo de 2,172 K. Piotr Kapitsa recibió el premio Nobel en 1978 por sus estudios al respecto, mientras que John F. Allen y Don Misener descubrieron el mismo efecto pero no recibieron el galardón. Ambos artículos fueron publicados «página con página» (*back to back* en inglés) en la revista *Nature* en 1937, lo que indicaba que el editor de la revista pensaba que ambos habían descubierto lo mismo. La controversia estaba servida, y el premio, como de costumbre, falló al singularizar en una persona lo que en realidad suele ser el trabajo de muchos.

Competición fratricida

Kapitsa no lo tuvo fácil: estudiante brillante en Leningrado, fue a parar al grupo del profesor Rutherford en Cambridge, donde montó su propio laboratorio de bajas temperaturas. Al ir a Rusia en lo que parecía ser solo un congreso para celebrar el centenario de Dmitri Mendeléyev (el físico que ordenó los elementos en la famosa tabla periódica) en 1934, ya no pudo salir del país. Kapitsa consiguió montar su laboratorio un par de años más tarde en Moscú y logró volver a licuar helio en 1937. Con el dinero liberado de pagar a Kapitsa, la Universidad de Cambridge contrató a Rudolf Peierls y John F. Allen. Este último venía inicialmente a trabajar con Kapitsa, pero, en su ausencia, utilizó su laboratorio, donde continuó el trabajo desarrollado por él. De alguna manera Kapitsa compitió contra su propio laboratorio. Bastó un año para que Fritz Lóndón publicara en *Nature* un artículo explicando la superfluidez del helio descubierta por Kapitsa. Allen y Misener, suponiendo que una fracción del helio se convierte en un condensado de Bose-Einstein. Esta historia está revisada en todo detalle por Sébastien Bailly, en el artículo «The discovery of superfluidity» («El descubrimiento de la superfluidez»), publicado en 2007 en la revista *Journal of Low Temperature Physics*.



Piotr Kapitsa en la década de 1930.

La teoría es una buena cosa, pero un buen experimento dura para siempre.

PIOTR KAPITSA

En el mundo de lo muy pequeño las partículas son indistinguibles. Pensando, por ejemplo, en los electrones, de los que no tenemos evidencia alguna de que posean un tamaño, podemos considerar que todos ellos son iguales entre sí. Para los protones, de los que sabemos que tienen un tamaño, y los átomos, formados por núcleo y electrones, podremos describirlos como idénticos a distancias a las que no resolvamos su estructura interna. Esta propiedad, denominada *indistinguibilidad*, tiene consecuencias fascinantes. No emana realmente de la teoría cuántica sino que es necesario postularla de manera independiente. Así, todas las partículas que existen pueden clasificarse en dos tipos según cómo se comporten cuando tengamos muchas de la misma clase. A unas se las denominó fermiones, en honor del físico italiano Enrico Fermi, y a otras bosones, por el físico indio Satyendra Nath Bose. Ambos tipos de partículas se distinguen únicamente en su comportamiento colectivo, esto es, si solo tenemos un bosón y un fermión, no observaremos ninguna diferencia cualitativa entre ambos en su conducta. Con esto queremos decir que, por ejemplo, tanto a un bosón como a un fermión se les puede acelerar, hacer colisionar contra un blanco, etc., utilizando idénticas técnicas para ambos, y que su comportamiento es similar. Ejemplos de fermiones son el protón, el electrón y el neutrón. Bosones pueden encontrarse en la física de altas energías, como la partícula denominada pion, unas doscientas veces más masiva que el electrón, y que ayuda a explicar la fuerza fuerte necesaria para la estabilidad de los núcleos. También el fotón, partícula de la luz, es un bosón, y de hecho es clave para entender las fuerzas eléctricas. O el archiconocido bosón de Higgs, descubierto en el laboratorio europeo CERN en 2012.

Para observar diferencias entre bosones y fermiones es necesario estudiar el comportamiento de, como mínimo, dos de ellos juntos. Dos bosones se comportan de modo completamente diferente a dos fermiones, sobre todo si estamos estudiándolos

logía hasta las ciencias de la información y la computación.

En el mundo de lo muy pequeño las partículas son indistinguibles. Pensando, por ejemplo, en los electrones, de los que no tenemos eviden-

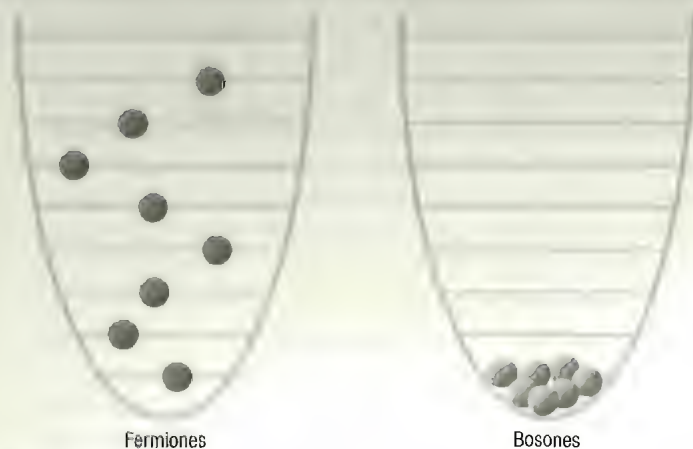
cia alguna de que posean un tamaño, podemos considerar que todos ellos son iguales entre sí. Para los protones, de los que sabemos que tienen un tamaño, y los átomos, formados por núcleo y electrones, podremos describirlos como idénticos a distancias a las que no resolvamos su estructura interna. Esta propiedad, denominada *indistinguibilidad*, tiene consecuencias fascinantes. No emana realmente de la teoría cuántica sino que es necesario postularla de manera independiente. Así, todas las partículas que existen pueden clasificarse en dos tipos según cómo se comporten cuando tengamos muchas de la misma clase. A unas se las denominó fermiones, en honor del físico italiano Enrico Fermi, y a otras bosones, por el físico indio Satyendra Nath Bose. Ambos tipos de partículas se distinguen únicamente en su comportamiento colectivo, esto es, si solo tenemos un bosón y un fermión, no observaremos ninguna diferencia cualitativa entre ambos en su conducta. Con esto queremos decir que, por ejemplo, tanto a un bosón como a un fermión se les puede acelerar, hacer colisionar contra un blanco, etc., utilizando idénticas técnicas para ambos, y que su comportamiento es similar. Ejemplos de fermiones son el protón, el electrón y el neutrón. Bosones pueden encontrarse en la física de altas energías, como la partícula denominada pion, unas doscientas veces más masiva que el electrón, y que ayuda a explicar la fuerza fuerte necesaria para la estabilidad de los núcleos. También el fotón, partícula de la luz, es un bosón, y de hecho es clave para entender las fuerzas eléctricas. O el archiconocido bosón de Higgs, descubierto en el laboratorio europeo CERN en 2012.

los a baja temperatura. En palabras llanas, útiles para conseguir una cierta comprensión, la diferencia fundamental entre fermiones y bosones es que los primeros presentan una clara aversión a estar juntos. No se puede poner un grupo de fermiones en el mismo sitio en reposo, esto es, moviéndose lo mínimo posible. Concentrándonos en los electrones, que hemos visto que viajan alrededor del núcleo a distancias diferentes, al ser fermiones no pueden estar todos en la misma órbita. Esto hace que cuanto mayor sea el número atómico, lo que implica mayor número de electrones, el átomo será más grande. Los electrones estarán cada vez más alejados del centro debido a que al ser fermiones tienen que ir ocupando las distintas órbitas. Esta es una propiedad relevante que contribuye también a la estabilidad de, entre otras cosas, las enanas blancas y las estrellas de neutrones. Las primeras son viejas estrellas sin combustible nuclear; las segundas son objetos celestes remanentes de explosiones de supernovas. La atracción gravitatoria no logra que se derrumben sobre sí mismas porque lo impide la aversión que tienen los fermiones —electrones en el caso de las enanas blancas y neutrones en el caso de las estrellas de neutrones— a estar juntos. Al no poder entenderse a partir de ninguna otra propiedad conocida anteriormente, este comportamiento de los fermiones recibió el nombre de *principio de Pauli*, postulado por el físico estadounidense de origen austriaco Wolfgang Pauli. Este principio generaliza lo que hemos explicado diciendo que dos fermiones del mismo tipo no pueden estar en el mismo estado cuántico. Los bosones, por el contrario, sí pueden estar todos en el mismo estado (figura 1).

El mar de Fermi

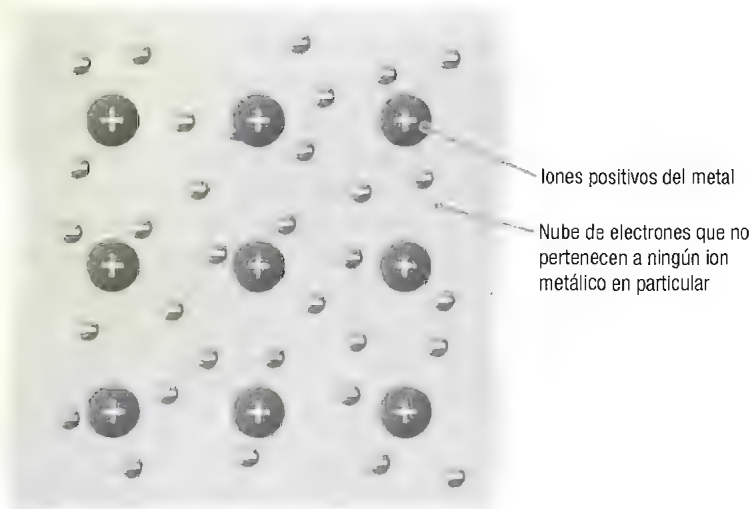
¿En qué situaciones tenemos muchos bosones o fermiones juntos? Para fermiones esto ocurre con frecuencia, ya que gran parte de las propiedades eléctricas de los materiales dependen de los movimientos de los electrones. Por ejemplo, en un metal tenemos, simplificando, un montón de iones que conforman

FIG 1



Las líneas horizontales representan la energía o el nivel de energía del estado cuántico. En la situación de la izquierda, los fermiones del mismo tipo ocupan cada uno una línea horizontal distinta porque no pueden estar en un mismo estado cuántico. En la situación de la derecha, los bosones, en cambio, sí pueden ocupar todos una misma línea.

FIG 2



En la configuración típica de un metal, los núcleos atómicos conforman una red, en tanto que los electrones no están atados a sus respectivos átomos sino que más bien constituyen una nube colectiva. Eso facilita que, si el material es conductor, puedan moverse a través de él.

una red. Entre ellos flota una gran nube de electrones que, si el material es un metal conductor, pueden moverse a través de él (figura 2). Este movimiento es el que da lugar a la corriente eléctrica que permite desde encender una bombilla hasta cortar con luz láser un tejido en un quirófano. En estos electrones el principio de Pauli juega un papel fundamental y da lugar a un concepto conocido con el nombre de *mar de Fermi*.

Para ilustrar el concepto del mar de Fermi consideremos un sistema simplificado. La idea es la siguiente: imaginemos que tenemos una caja profunda, una suerte de piscina vacía, donde podemos meter nuestros fermiones. Primero introducimos uno, que se acomodará en el fondo del contenedor. Después introducimos un segundo fermión. Debido al principio de exclusión, este no podrá estar en el mismo estado que el primero, por lo que lo evitará. Si seguimos con este proceso y llenamos el fondo, el siguiente que introduzcamos de alguna manera se apilará sobre la capa anterior. Así, al ir introduciendo fermiones ocurrirá más o menos lo mismo que si se tratara de introducir balones de fútbol en una piscina, es decir, la iremos llenando poco a poco. Una vez lleno el contenedor hasta la mitad, si ahora nos preguntamos cómo podría un fermión moverse hacia un lado, tendremos un proceso análogo al caso de los balones en la piscina: para empezar, una pelota de la superficie puede moverse con una pequeña patada, y casi no necesita que esta sea muy fuerte. En cambio, un balón del interior, por mucho que lo golpeemos, lo tendrá muy difícil para moverse.

En el caso de los fermiones en la caja, uno de la superficie puede desplazarse sin problemas con un ligero impulso. Sin embargo, un fermión del interior, por mucho que lo intentemos, no podremos moverlo, a no ser que hagamos un gran esfuerzo, moviendo toda la columna de fermiones que tiene por encima. Esto hace que los fermiones que se pueden desplazar, que serían los electrones que transportan la carga eléctrica en un material conductor en el mundo real, se muevan por la superficie del mar de Fermi, nombre que recibe el conjunto de fermiones que conforman el fondo.

Formación del condensado de Bose-Einstein

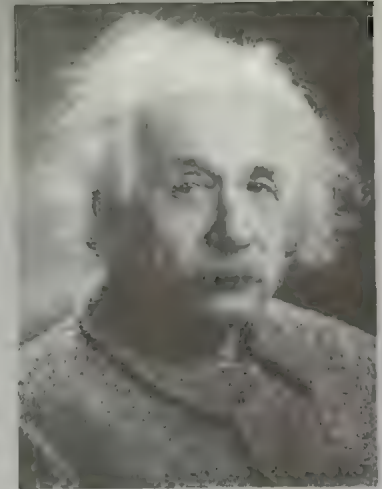
Los bosones, a diferencia de los fermiones, son mucho más proclives a juntarse. En el ejemplo anterior, si en lugar de fermiones tuviéramos bosones, ocurriría lo que se detalla a continuación. Introduciríamos un bosón en el contenedor; al añadir el siguiente, este segundo bosón se situaría más o menos como si el primero no estuviera. Si la temperatura es suficientemente baja, al ir añadiendo bosones estos tenderían a ir juntándose formando el condensado de Bose-Einstein. El resultado final, si se forma un condensado, sería como si tuviéramos una sola pelota en la piscina pero de un tamaño considerablemente mayor. Esto tiene dos consecuencias capitales. La primera es que al crecer el condensado, este llega a alcanzar tamaños varios órdenes de magnitud (cada orden de magnitud es un factor 10) mayores que los típicos de los bosones originales. Este es el motivo por el que son tan interesantes, ya que hacen que un sistema cuántico de primera magnitud, con su incertidumbre asociada en la posición y momento, alcance tamaños mucho mayores, macroscópicos. La segunda consecuencia es que se produce un efecto multiplicador debido a que todos los bosones hacen esencialmente lo mismo.

¿Mares o condensados?

¿Bajo qué condiciones se ponen de manifiesto estas diferencias y tenemos un mar de Fermi o un condensado de Bose-Einstein? Consideremos primero un gas, por ejemplo de sodio, potasio o el algo menos conocido rubidio, a temperatura ambiente, atrapado en una región del espacio del tamaño de una micra, es decir, una millonésima de metro. Lo que tenemos es un grupo de átomos que se mueven en todas direcciones con una velocidad promedio de unos 300 m/s. En los experimentos suele haber entre mil y un millón de átomos. Obviamente, en este caso distan mucho de estar en reposo en el mismo sitio, lo que hace que ahora sea completamente irrelevante si los átomos son bosones o fermio-

UNA VALIOSA AYUDA

La historia de cómo se propuso por primera vez la posibilidad de la formación del condensado de Bose-Einstein comienza la primera vez con la ayuda de Albert Einstein, ocurrido en la década de 1920. Un físico indio de origen bengalí llamado Satyendra Nath Bose. En el, Bose utilizaba un argumento estadístico para entender cómo emitía luz un *cuero negro*. Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, sin reflejarla, pero también emite toda la radiación de su interior. Lo interesante aquí es que el argumento descrito por Bose no había convencido a la revista científica y este no conseguía publicar su resultado. Einstein reconoció la valía del trabajo y decidió traducirlo y ayudarlo a publicarlo. El físico alemán generalizó después el trabajo original al caso de los átomos de un gas, en la situación ideal en que no chocaran entre sí. El resultado es la denominada *estadística de Bose y Einstein*.



La aportación de Einstein

El problema simplificado es el de un gas de átomos en una caja moviéndose sin interactuar (o con choques estrictamente elásticos). En este caso podemos preguntarnos cuántos átomos de la caja van a una velocidad determinada y hacer una estadística. Por ejemplo, hay un 1% que va muy rápido, a 3000 km/h, un 40% que va a una velocidad en torno al promedio, y hay de nuevo pocos átomos con velocidades muy bajas. Boltzmann dedujo una fórmula para esta estadística en el caso de tener átomos que se mueven siguiendo sencillamente las leyes de Newton. Bose lo que había hecho era obtener la fórmula pertinente para el caso de partículas de luz. Al generalizar las fórmulas de Bose al caso de los átomos, Einstein observó inmediatamente que si se bajaba la temperatura las fórmulas decían que el número de átomos a baja energía crecería desmesuradamente, produciendo un condensado; mientras que habría muy pocos átomos haciendo lo que harían si fueran como decían Newton y Boltzmann.



Albert Einstein en 1947 (foto superior) y Satyendra Nath Bose en 1925.

nes. Si bajamos la temperatura, la velocidad de los átomos va disminuyendo, hasta que los tenemos cada vez más cerca y moviéndose a velocidades progresivamente más bajas. El quid de la cuestión es ahora el siguiente: para que la naturaleza cuántica de los átomos juegue un papel importante necesitamos que el comportamiento probabilístico de un átomo alcance la posición de otro átomo. Ya hemos visto que no podemos saber con precisión dónde está y a qué velocidad se mueve un átomo. La imprecisión en la posición, algo así como la longitud de la onda cuántica asociada, para un átomo de masa m y velocidad v se conoce y viene dada por la fórmula de Louis de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Para un átomo de rubidio a temperatura ambiente, la longitud de onda es de 10^{-11} m, que es muchísimo menor que la distancia promedio entre dos átomos en el gas, que es de unos 10^{-7} m. Este número significa que tenemos aproximadamente unos 10^{11} átomos por metro cúbico en los experimentos de condensados de Bose-Einstein, un millón de veces menos que la densidad del aire que se encuentra a su alrededor. Esta cifra es interesante, ya que los condensados producidos son en realidad un gran vacío si los comparamos con el aire que respiramos. Sabida la densidad del gas atómico, podemos conocer la interdistancia típica entre los átomos. Al ser tan diferentes la longitud de onda del átomo y la interdistancia entre ellos, no se produce ninguna interferencia entre ambos fenómenos. Algo similar ocurre con las olas del mar: si una ola de un cuarto de metro de longitud de onda (la distancia entre dos crestas) choca contra un barco de doce metros de eslora, este la encaja sin mayor problema, sin prácticamente balancearse. Si por el contrario la longitud de onda es de diez metros, como ocurre habitualmente en el Atlántico, las olas transfieren muchísima energía al barco, produciendo un constante balanceo y dificultando la navegación.

Para que el comportamiento ondulatorio de un átomo, su incertidumbre cuántica, alcance a otro átomo del gas, necesitamos



En la imagen superior, sistema experimental del Laboratorio del Grupo de Gases Ultrafríos de la profesora Leticia Tarruell en el Instituto de Ciencias Fotónicas de Castelldefels (España). La fotografía muestra parte del sistema de láseres y, al fondo, la cámara en la que se forma el condensado de Bose-Einstein. La imagen inferior muestra equipamiento usado en el Instituto Tecnológico de Georgia (Georgia Tech) en Estados Unidos para estudiar un condensado de Bose-Einstein compuesto de átomos de sodio.

enfriar a este hasta valores extraordinariamente bajos, nada menos que del orden de $0,000001$ K. A estas temperaturas, la longitud de onda del átomo será más o menos de una millonésima de metro, y empezará a ser comparable con la distancia entre los átomos. De alguna manera podemos decir que al ir enfriando los átomos, estos pasan de comportarse como objetos puntuales, como los describiría Newton, a tener un comportamiento ondulatorio, como los describiría la mecánica cuántica. En esas condiciones comienza a levantarse el telón que ocultaba su conducta fermiónica o bosónica, mostrando los que actúan como fermiones y los que actúan como bosones.

Se sabe que otro átomo habitual en estos experimentos, el rubidio, actúa como un bosón. Por tanto no habrá ningún inconveniente en que todos los átomos estén en el mismo sitio, dentro de la incertidumbre dada por la longitud de onda de De Broglie, con el mínimo de velocidad posible. Si esto último ocurre, esencialmente todos nuestros bosones constituirán una gran nube de partículas que se comportará como un todo; el balón gigante que describíamos antes. Este es el condensado de Bose-Einstein. De hecho, lo que uno observa es que si cuenta cuántos átomos tienen una determinada velocidad, por debajo de una temperatura dada, se produce un cambio de comportamiento espectacular si el gas es de bosones. El número de átomos a velocidad muy baja aumenta de manera tremenda ya que no hay ningún impedimento para que todos (o una fracción muy significativa de los mismos) pasen a engrosar el condensado.

Primera demostración experimental

Tuvieron que pasar décadas desde la formulación teórica del condensado hasta que este fue observado por primera vez en el laboratorio. Durante años, los esfuerzos más prometedores buscaban producirlos a partir de gases de átomos lo más sencillos posible. Así, el profesor Daniel Kleppner del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) estuvo casi veinte años intentando condensar hidrógeno. Durante ese tiempo pasaron por su grupo decenas de

jóvenes investigadores de gran talento que vieron con desesperación que aun llegando a estar realmente cerca, no conseguían producir el condensado. En 2015 se cumplieron veinte años del descubrimiento experimental del condensado de Bose-Einstein gaseoso. Para celebrarlo hubo una sesión especial en el congreso más importante sobre el tema, el *Bose-Einstein Condensation-Frontiers in Quantum Gases* que reúne en la Costa Brava (España) a todos los investigadores, experimentales y teóricos, que trabajan en este campo en el mundo. Una de las ponencias de ese año la impartió el Dr. Harald Hess, antiguo miembro del grupo del profesor Kleppner. Hess narró con gran detalle la profunda frustración que vivió como joven científico pero también cómo de alguna manera aquella experiencia había sido de gran utilidad para su carrera posterior. No lo decía tanto por el conocimiento técnico como por la capacidad para sobreponerse a las múltiples dificultades con que se fueron topando. Kleppner parecía ser la persona que descubriría el condensado, cerrando el círculo iniciado por Bose y Einstein setenta años antes, pero no fue el caso.

En los experimentos con hidrógeno la idea era utilizar técnicas como las que se habían desarrollado para licuar todos los gases hasta el helio, en concreto el efecto Joule-Thomson descrito en el capítulo anterior. Dicho de modo simple, se pretendía bajar la temperatura del gas de hidrógeno y contenerlo en un recipiente con las paredes enfriadas con helio líquido. Entre otras cosas, un problema que resultó difícil de superar fue sencillamente que el hidrógeno se pegaba a las paredes, perdiéndose el gas.

Estos problemas derivados de la presencia de paredes físicas en el contenedor llevaron al propio Hess a darse cuenta de que una solución fantástica sería conseguir mantener el gas atrapado en el vacío mediante campos electromagnéticos. El procedimiento no es sencillo. Cualquiera que haya jugado con imanes sabrá lo difícil que es conseguir que una pieza metálica quede suspendida en el aire sobre uno de ellos. Lo más habitual es que la pieza gire sobre sí misma y acabe atraída por el imán, pegándose a él. Una forma de conseguir que se mantenga flotando es utilizar una peonza metálica y hacerla girar; en este caso se puede conseguir encontrar una posición estable y dejarla colgada

del aire. Con los átomos ocurre algo parecido, hay que buscar una configuración que consiga atraparlos y dejarlos colgados en el vacío. La ventaja fundamental es que en este caso no habrá ninguna pared a la que puedan pegarse.

La segunda ventaja de estas trampas magnéticas es que se puede utilizar el mismo método que describimos para enfriar café, o sea, soplar y llevamos por delante las moléculas rápidas de la superficie del líquido, para disminuir la temperatura del gas. El procedimiento se basa en una configuración en la cual a la trampa magnética y a los átomos podemos visualizarlos como si fueran pelotas de goma botando dentro de un cubo, rebotando de manera elástica contra todas las paredes del mismo. Con este sistema las tendremos moviéndose por el cubo con diferentes energías y velocidades. Si ahora abrimos un agujero a buena altura en el cubo, las pelotas con mayor energía, que botan más alto y llegan a la altura del agujero, irán saliendo por él, abandonándolo. De este modo, al cabo de un rato tendremos un cubo con pelotas con poca energía, ya que habremos eliminado las más energéticas quedándonos solamente con las lentas. Con los átomos el procedimiento es idéntico, lo que se hace es bajar las paredes que confinan el gas, de forma que los átomos más energéticos puedan escapar de la trampa. Por este procedimiento el número de átomos disminuye y bajamos la temperatura del gas atrapado.

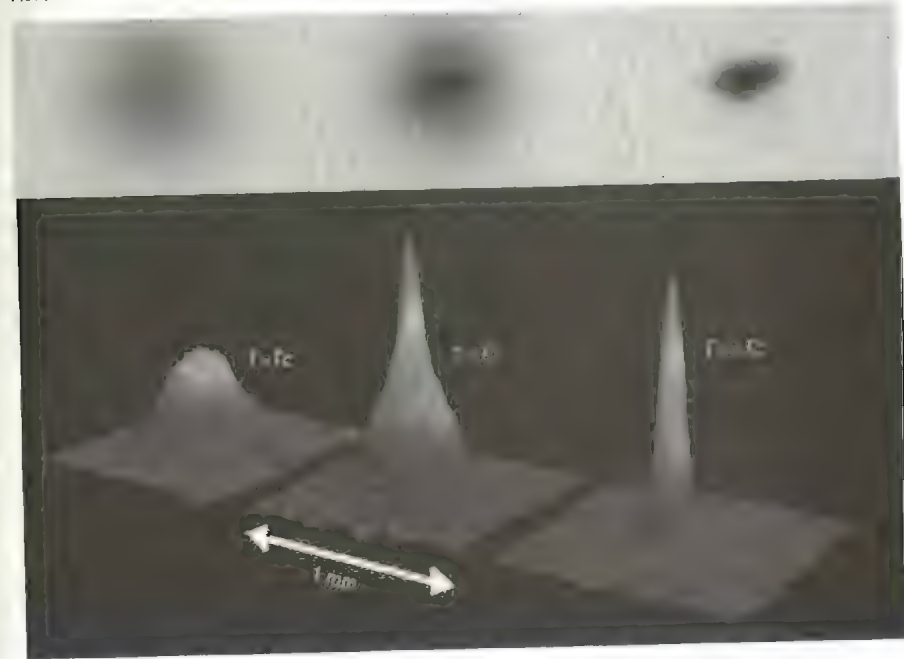
Estas trampas combinadas con el enfriamiento láser descrito en el capítulo anterior fueron la base de los experimentos de Eric Cornell y Carl Wieman por un lado y el grupo de Wolfgang Ketterle por otro, por los que recibieron el premio Nobel en 2001.

Resultó ser mucho más sencillo utilizar átomos más pesados para observar el fenómeno de la condensación. Los dos grupos mencionados, el de Cornell y Wieman y el de Ketterle, se concentraron en condensar gases de átomos mucho más pesados, de rubidio y de sodio, respectivamente. Estos átomos alcalinos tienen una estructura interna más o menos sencilla. El núcleo atómico está rodeado de muchos electrones que están en configuraciones muy estables. Tras estas capas internas de electrones, ambos átomos tienen un solo electrón en la capa más alejada del núcleo. Es este electrón solitario, denominado *de valencia*, el que determi-

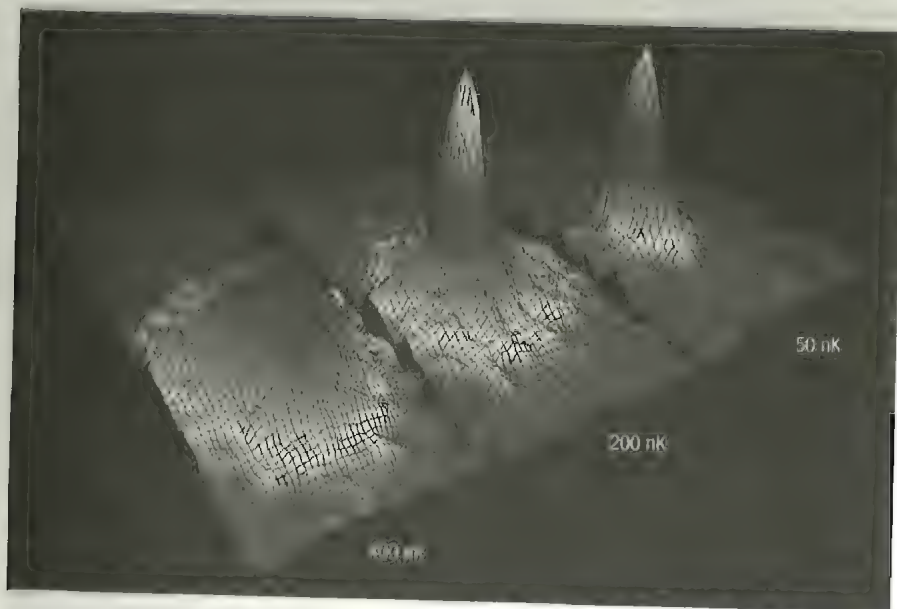
na en gran medida cómo se comporta el átomo completo, especialmente sus propiedades químicas, y en nuestro caso también las magnéticas. En particular, aun siendo agregados de muchas partículas —protones, neutrones y electrones—, los átomos de rubidio y sodio se comportan, si uno los observa a una distancia a la que no distinga cómo están hechos, como bosones.

Así fue cómo en 1995 ambos grupos experimentales produjeron por primera vez en la historia dos condensados de Bose-Einstein. En las figuras 3 y 4 podemos ver cómo se observó dicho

FIG. 3



Observación de la transición entre gas clásico y condensado de Bose-Einstein, cuando la temperatura del gas está ya por debajo de la crítica, en un experimento realizado en el laboratorio del profesor Wolfgang Ketterle en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Las tres imágenes superiores son la sombra de la nube de átomos vista desde arriba una vez se ha dejado al gas expandirse durante 6 milisegundos. Por debajo de la temperatura crítica ($T < T_c$ y $T \ll T_c$), la nube de átomos aparece con un pico tremendamente pronunciado, que implica que los átomos prácticamente no se han movido al expandirse debido a que todos están en el estado de mínima energía. El número de átomos es más o menos de 700 000, y la temperatura de transición es de 2 microkelvins.



Observación de la transición entre gas clásico y condensado de Bose-Einstein, una vez que la temperatura del gas está por debajo de la crítica, realizada en un experimento llevado a cabo en el laboratorio de los profesores Eric Cornell y Carl Wieman de la Universidad de Colorado. El número de átomos en el experimento es de unos 2 000, menor que el del experimento expuesto en la figura 3. Las tres imágenes muestran la distribución de velocidades del gas antes de condensarse, a 400 nanokelvins (nK) (izquierda), y una vez se ha condensado, a 200 nK (centro) y a 50 nK (derecha). La distribución se concentra fuertemente en la zona de velocidad cero, como se espera del condensado de Bose-Einstein.

condensado. Tanto en el grupo de Ketterle (figura 3) como en el de Cornell y Wieman (figura 4) se hizo algo similar. Los científicos bajaron la temperatura del gas todo lo que pudieron, mediante láseres y la evaporación de átomos rápidos. Una vez el gas se estabilizaba, quitaban todas las trampas que hacían que los átomos estuvieran confinados en el espacio y dejaban que el gas se expandiera. La temperatura, como vimos en el primer capítulo, no es más que una medida de la energía de movimiento de los átomos del gas. Si la temperatura es alta, los átomos volarán a grandes velocidades y pasado muy poco tiempo tendremos una

nube de una extensión considerable. Si disminuimos la temperatura, las velocidades típicas de los átomos en el gas bajan y al dejarlos libres no irán tan lejos como antes, dando lugar a una nube bastante más pequeña tras la expansión. De hecho, de esta velocidad de expansión, y de la forma que tiene la nube después de expandirse, se puede inferir la temperatura. Obsérvese que no hay muchas más formas de medir la temperatura a estas escalas y rangos.

CORRELACIONES CUÁNTICAS EN ACCIÓN

Producir el primer condensado de Bose-Einstein fue un gran hito. Por primera vez se confirmaba de forma clara y directa la predicción de Bose y Einstein. Se demostró la existencia de un nuevo estado de la materia en el que la física cuántica participa y se manifiesta a escala *mesoscópica*, esto es, aquella escala de longitud en la que pueden describirse fenómenos o propiedades de la materia sin fijarse en los átomos de manera individual. El de Cornell y Wieman tenía unos 2 000 átomos, el de Ketterle más de medio millón de átomos, todos ellos produciendo un gran objeto cuántico con las propiedades predichas anteriormente.

Desde el primer condensado (1995) hasta hoy han pasado ya más de veinte años y los investigadores del campo de los gases atómicos ultrafríos han seguido explorando las inesperadas propiedades de la materia a tan baja temperatura. Múltiples frentes se han abierto, conectando la física de átomos ultrafríos con casi cualquier disciplina de la física. La razón primordial son los grandes avances en la precisión y el control de los átomos, unida a los diversos tipos de átomos utilizados. Esto ha permitido estudiar estados de la materia en los que los átomos establecen relaciones cuánticas incluso más complejas. Veamos en qué consisten.

La clave son las correlaciones, esto es, las interdependencias entre mediciones realizadas sobre diferentes partes del sistema. En el mundo habitual tenemos correlaciones causales, por ejemplo, si lanzo una pelota contra una pared, un instante más tarde

La física cuántica ha dejado de ser una teoría abstracta para especialistas. Ahora tenemos que incorporarla a nuestra educación y cultura.

CLAUDE COHEN-TANNOUDJI

oír un sonido provocado por su rebote. Entre ambos sucesos se puede establecer una correlación temporal. Hay algunos más sutiles, como por ejemplo el que exponemos a continuación. Imagine que tiene preparado el equipaje para ir en un viaje a la Luna, incluyendo un par de guantes. Suponga ahora que va a poner la pareja de guantes en una caja pero olvida colocar uno de los dos dentro. Una vez que llega usted a la Luna, comprueba, para su desgracia, que el único guante que tiene consigo es el de la mano izquierda. En ese momento, la incertidumbre que había sobre qué guante se había quedado en la Tierra se disipa. Ahora, una vez sabido qué guante ha viajado a la Luna, es seguro que el guante derecho se ha quedado tranquilamente en el planeta. Estas correlaciones entre los resultados que obtendríamos en diferentes experimentos son clásicas, en el sentido de que son habituales y las tenemos integradas en nuestro día a día. Hay más ejemplos, como el caso de tener una baraja de cartas, ponerlas todas boca abajo e ir volteándolas una a una buscando los ases. A medida que vayan saliendo, la probabilidad de que queden ases entre las restantes cartas va disminuyendo. Así, si hemos destapado los cuatro ases y quedan diez cartas boca abajo sabremos que el resultado de nuestro experimento será negativo aun sin hacerlo. De nuevo, el resultado de un experimento, «dar la vuelta a la carta y ver si es un as», está correlacionado con las medidas realizadas previamente.

Estas correlaciones llamadas clásicas son llamativas pero casi siempre se basan en que tenemos un conocimiento previo; en este caso, sabemos que hay dos guantes, o cuatro ases en una baraja, en los ejemplos anteriores. En el mundo cuántico pueden darse correlaciones mucho más profundas y complejas. Los científicos están intentando controlarlas para, por ejemplo, mejorar nuestra capacidad de cálculo, la privacidad de nuestras comunicaciones o aumentar las prestaciones de sensores.

Uno de los ejemplos paradigmáticos es el experimento EPR, por las siglas de los apellidos de Albert Einstein, Borís Podolski

y Nathan Rosen, propuesto en 1935. Lo explicaremos con colores. Supongamos que tenemos dos discos de cristal transparente que pueden ser de color rojo o verde, pero que estamos seguros de que juntos dan amarillo. Es decir, si uno es verde el otro es seguro rojo y viceversa. Lo interesante es que como son cristales cuánticos —en nuestro *gedanken experiment* o experimento mental— la situación resultante es que ambos pueden ser de los dos colores. Léase: si cojo un cristal solo y lo observo, a veces lo veré rojo y a veces verde. Esto pasa siempre que repito el experimento; si miro uno, en promedio la mitad de las veces lo veo rojo y la otra mitad verde. La correlación cuántica que trajo de cabeza a Einstein aparece cuando después de observar uno de los cristales, me fijo en el otro. ¡El color que observo en este segundo cristal es siempre el complementario del que he observado en el primero! Suponga ahora que el experimento se hace lanzando los cristales, sin observarlos, en direcciones opuestas, a gran velocidad y muy lejos, de forma que uno lo observamos en Pernambuco y el otro en Cuenca (es un decir). Si primero miramos el de Cuenca tendremos un resultado aleatorio para varios experimentos, verde, rojo, rojo, etc., mientras que en Pernambuco por el contrario aparecerán siempre los complementarios. Parece que al medir en Cuenca se haya transmitido de alguna forma la información hasta Pernambuco. Es decir, la probabilidad de que sea rojo o verde, que *a priori* pareciera ser 1/2 para ambos, en realidad deja de ser 1/2 para el segundo cuando hemos medido el primero. Lo hemos descrito de manera muy simplificada: son posibles múltiples variantes dependiendo de las partículas que se entrelacen. La naturaleza estrictamente aleatoria de la primera medida y la correlación de la segunda han sido demostradas experimentalmente. Durante años se ha intentado encontrar una alternativa que explique este fenómeno, que parece ser genuino de la mecánica cuántica.

Este tipo de efectos son debidos al *entrelazamiento cuántico*. Tienen múltiples aplicaciones y son el día a día en el mundo cuántico del frío absoluto.

Temperaturas en el cosmos

Nuestro entorno no es más que la superficie de una esfera relativamente pequeña rodeada de vacío. El clima más o menos suave que nos rodea es poco común en nuestro entorno galáctico. En realidad el cosmos es un lugar, esencialmente, muy frío.

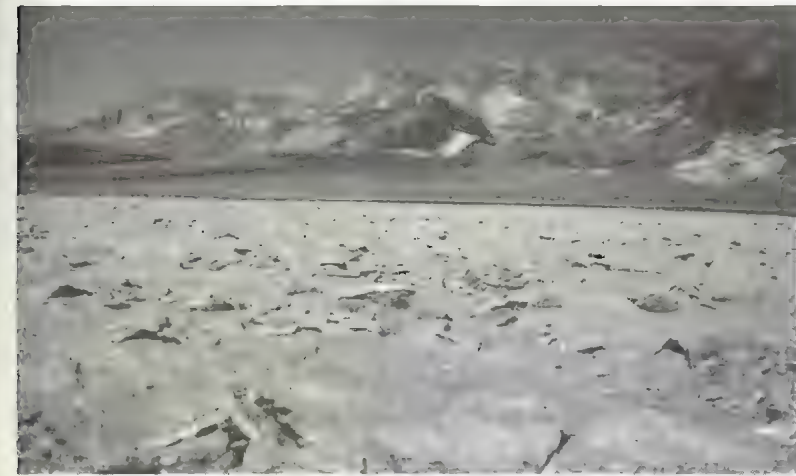
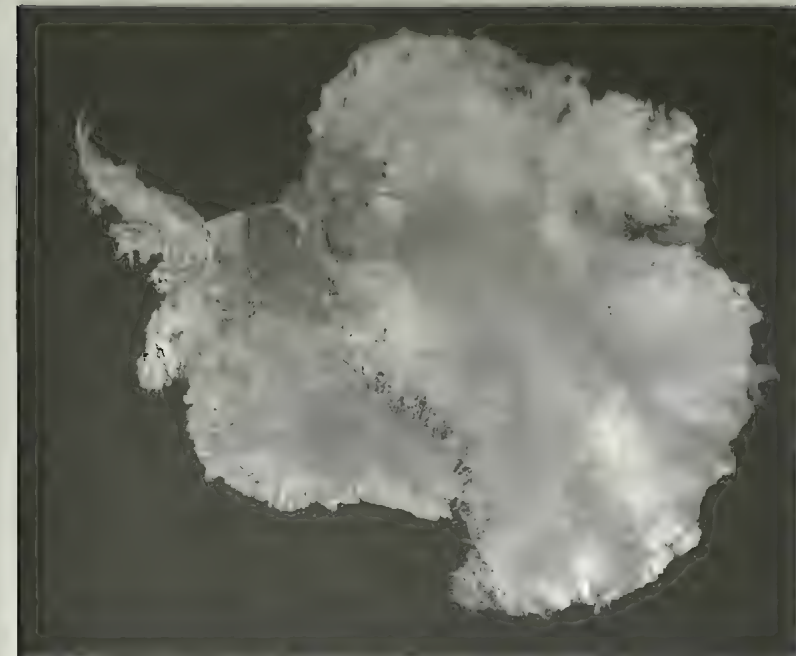
Comencemos por lo más cercano a nosotros. En el primer capítulo hablamos de las temperaturas más extremas medidas en la superficie de la Tierra. Concretando, las mediciones *in situ* van desde $-89,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la Antártida hasta $56,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el Valle de la Muerte (véanse las fotos de la pág. 95), si bien se han detectado desde satélite $93,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la Antártida y $70,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el desierto de Lut, Irán. Por suerte, la mayor parte del tiempo las temperaturas en la superficie del planeta son bastante suaves, lo que ha permitido el desarrollo de la vida tal y como la conocemos. Pero, además de en la superficie, ¿qué temperaturas alcanza el planeta en su interior? ¿Sabemos algo sobre ellas por adentrarnos en él? ¿Está frío o, por el contrario, muy caliente?

La Tierra tiene un radio de casi 6400 km, cifra impactante si la comparamos con lo poco que nos separamos estrictamente de la superficie, ya que en un día cualquiera, por ejemplo bajando del piso a la calle, subiendo a la oficina, etc., nos movemos en un rango que en la mayoría de los casos no supera los 30 m de altura. El planeta está estructurado en capas, de forma parecida a una cebolla, con temperaturas que, por lo que sabemos, van aumentando a medida que nos adentramos en su interior.

Esto parece quizá difícil de intuir: nuestra experiencia cotidiana nos dice lo contrario, ya que al adentrarnos en una cueva normalmente la temperatura baja. Esto se debe a que en nuestras latitudes el contraste térmico se debe a estar o no expuestos al sol. La parte más profunda del planeta es el núcleo interior, que se cree es sólido o al menos no parece ser fluido, y que posee una densidad tremenda de unos 13000 kg/m^3 . Si utilizamos como referencia que un metro cúbico de agua pesa una tonelada, el núcleo interno del planeta es trece veces más denso que el agua. De hecho, se cree que está compuesto de hierro. Este núcleo duro se extiende hasta un radio de unos 1200 km ; a partir de aquí comienza una segunda capa, el núcleo exterior, de comportamiento líquido, que llega hasta distancias de 3400 km desde el centro del planeta. Esta gran capa parece tener una baja viscosidad y corrientes de convección que transportan grandes cantidades de calor. La convección es una de las formas de transportar calor. Las otras son la radiación y la conducción. La convección necesita de un medio fluido, y el ejemplo más habitual son las corrientes que se forman en un cazo al hervir agua.

Algo más cerca de la superficie, a casi 3000 km de profundidad, comienza el manto terrestre. En la parte más profunda las presiones son enormes, lo que hace que los silicatos que lo componen tengan grandes viscosidades, por lo que fluyen muy lentamente. Las corrientes de convección del manto terrestre son las responsables últimas de los movimientos de las placas tectónicas que han ido conformando el aspecto del planeta a lo largo de miles de millones de años. El manto se divide en dos partes, el superior y el inferior. El superior llega hasta la corteza terrestre, que es considerablemente más estrecha, de unos 40 km de profundidad. El manto es, pues, la capa con más material del planeta.

¿Cómo conocemos estas propiedades? Está claro que la superficie, tras varios siglos de exploración geográfica, no depara grandes sorpresas. Y los actuales medios técnicos nos permiten recorrerla con suma facilidad; hoy podemos desplazarnos 10000 km fácilmente, y situarnos en la otra punta del planeta en cuestión de horas. Pero ¿podemos hacer lo mismo hacia su interior? Probemos a adentrarnos en ese interior del planeta; si



En la foto superior, vista de satélite del continente antártico, donde se ha registrado la temperatura más fría de la Tierra. La más alta medida *in situ* corresponde al Valle de la Muerte en Estados Unidos (abajo). La fotografía corresponde a la zona de salinas conocida como Devil's Golf Course («campo de golf del diablo»).

lo hacemos con una pala comprobaremos inmediatamente que llegar a más de 5 m es ya un gran logro. Pensaremos, con razón, que hace tiempo que hemos desarrollado tecnologías mejores, que nos han permitido adentrarnos en el planeta y explorar su subsuelo. Y ciertamente hemos mejorado mucho; de hecho hoy día hemos conseguido excavar a tanta profundidad como algo más de 10 km, esto es, tres órdenes de magnitud respecto del agujero hecho a golpe de pala. El punto más profundo excavado es el conocido como agujero superprofundo de Kola (*Kola Superdeep Borehole*, en inglés) realizado por la entonces Unión Soviética en la península de Kola, en la parte de Rusia cercana a Finlandia. El agujero en cuestión llega a una profundidad de 12 262 m. Pese a todo, es solo una minúscula parte de la distancia que nos separa del centro de la Tierra. Si este es el agujero más profundo, ¿cómo podemos saber tanto sobre la estructura de la Tierra? La fuente más fiable es la velocidad que alcanzan las ondas sísmicas en el interior del planeta. Así podemos saber que el núcleo de la Tierra parece tener propiedades idénticas a las del hierro. De ser así, la transición entre sólido y líquido que tiene lugar entre el núcleo interno y el externo debe ser causada por la tremenda presión del interior, que hace que el hierro se solidifique. Podemos entonces, en principio, estudiar con hierro en nuestros laboratorios a qué temperatura tiene lugar esa transición, lo que nos permite estimar las temperaturas del núcleo, que debe de estar a entre 4 000 y 8 000 K.

La convección en el manto terrestre desplaza grandes cantidades de material, por lo que parece probable que su parte baja esté también a una temperatura cercana a los 4 000 K, bajando hasta unos 2 000 K en la parte superior. Así pues, a unos 700 km de profundidad, más o menos la misma distancia que hay entre Barcelona y Toledo, la temperatura debe ser de unos 2 000 K. El gradiente o variación de temperaturas es por tanto infernal a medida que nos adentramos. De hecho, aun siendo algo menor, el gradiente en nuestra corteza es muy elevado. Todos los intentos de alcanzar mayores profundidades que esos 12 km han fracasado debido a que se han encontrado temperaturas mayores de las esperadas. En el caso del agujero de Kola, el proyecto

original era alcanzar los 15 km de profundidad, pero a algo más de 12 las temperaturas eran ya de 180 °C, lo que hacía prever que llegarán a unos 300 °C a unos 15 km.

No solo no hemos podido llegar a mucha profundidad, sino que además no tenemos mucha idea de cómo hacerlo. En comparación con nuestra capacidad para explorar el sistema solar, con cientos de misiones llevadas a cabo desde que conseguimos poner en órbita el Sputnik en 1957, realmente no nos hemos adentrado muy lejos en la exploración directa del interior del planeta. En la misión Voyager se ha conseguido llegar, en el momento de escribir estas líneas, a la friolera de 20 109 347 094 km de distancia de la Tierra, y continúa aumentando. Comparemos esta distancia con los 40 km que recorrió Filípides para informar de que habían ganado a los persas en la batalla de Maratón: hay ocho órdenes de magnitud de diferencia. El mismo juego de comparaciones, tomando los 100 m de profundidad que tenía una mina típica en la época, y los 12 km alcanzados en Kola, nos da dos órdenes de magnitud. Volviendo a nuestra carrera para llegar al cero absoluto de temperatura, tenemos el hecho de que se ha conseguido bajar desde los 300 K habituales hasta los nanokelvins obtenidos por Cornell y Wieman. Esto da nada menos que once órdenes de magnitud de diferencia.

Resumiendo lo mostrado con esta pequeña excursión hacia el centro de la Tierra, al adentrarnos en el subsuelo profundo nos alejamos del frío. Veamos qué ocurre en la dirección opuesta, alejándonos de la superficie hasta alcanzar el entorno cósmico.

FRÍO LUNAR

Este libro trata de cómo la búsqueda del frío nos ha llevado a avanzar en múltiples frentes, permitiendo conservar alimentos, entender la materia que nos rodea, y un largo etcétera. En el interior de la Tierra, como acabamos de ver, no encontramos mucho

No es la posesión de la verdad, sino el éxito que acompaña a su búsqueda, lo que enriquece al buscador y le trae la felicidad.

MAX PLANCK

frío, cosa que quizá ya intuíamos. Para encontrarlo, basta con hacer dos cosas: alejarnos del Sol o, sencillamente, ir más allá de la atmósfera que rodea nuestro planeta, hacia el espacio exterior.

Observando el cielo vemos, según la hora del día, un objeto bastante más grande que el resto y con apariencia rugosa que es ni más ni menos que nuestro satélite natural y el máspreciado, la Luna. Orbitando a unos 384 000 km de distancia de la Tierra, tenemos una bola con una masa no mucho mayor que una centésima parte de la de nuestro planeta, un diámetro de la tercera parte del de la Tierra, y una atracción gravitatoria de la sexta parte de la terrestre. No tiene atmósfera, lo que entre otras muchas cosas complica los alunizajes, que no pueden realizarse como suelen aterrizar los aviones en la Tierra, apoyándose en la resistencia del aire, sino que obliga a utilizar cohetes propulsores continuamente. Al no tener atmósfera, la temperatura en la superficie de la Luna depende abruptamente de si está siendo iluminada directamente por el Sol o no. En zonas soleadas la temperatura puede llegar a unos 120 °C o más, mientras que en las que no lo están las temperaturas pueden caer a valores extremos de -160 °C (véase la imagen de la página contigua). En algunos cráteres lunares puede ser incluso más baja. Gracias a la nave LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) de la NASA, lanzada en 2009, se ha logrado medir con precisión la temperatura en algunos cráteres del polo sur de la Luna, encontrando mínimas de -247 °C, unos 26 K, lo que representa la temperatura más baja natural medida directamente en el sistema solar.

Esto nos da una idea de lo desapacible que es nuestro entorno más cercano. A 10 km de profundidad en nuestro planeta hemos visto que el medio es hostil para la vida debido en parte a las altas temperaturas; y en el objeto celeste más cercano, la Luna, el calor y el frío excesivos también resultarían mortíferos de no ser por los trajes aislantes. Especulando sobre el futuro de la humanidad, quizá si conseguimos establecer con éxito una base habitable en la Luna podamos aprovechar las zonas más frías para montar fantásticos centros de cálculo cuántico basados en tecnologías superconductoras, lo que podría permitirnos adentrarnos de verdad en la denominada segunda revolución cuántica. Esta



Algunas zonas de la superficie lunar, cuando no reciben luz solar, pueden experimentar descensos de temperatura capaces de llegar fácilmente a -160 °C. Por otra parte, la sombra proyectada por las paredes de ciertos cráteres profundos sobre algunas zonas de su interior puede también hacer descender notablemente la temperatura. En la imagen, el cráter Daedalus, situado en la cara oculta de la Luna.

tendrá lugar cuando consigamos utilizar todas las posibilidades de la mecánica cuántica para hacer cálculos, aprovechando particularmente las posibilidades de explorar múltiples opciones en formas imposibles para la tecnología actual.

RESTO DEL SISTEMA SOLAR

Aparte del satélite que nos provoca las mareas oceánicas, nuestro entorno más inmediato es el sistema solar en su conjunto, con el Sol como fuente fundamental de energía para toda la región y responsable directo de que en los planetas que lo acompañan las temperaturas vayan de seriamente altas hasta francamente bajas. Veámoslo poco a poco.

El Sol es un lugar bastante inhóspito: básicamente se trata de un gran reactor nuclear; un objeto esférico de un radio unas 100 veces mayor que el de la Tierra y una masa 300 000 veces mayor que la de nuestro planeta. De estos números ya deducimos que aparte de ser más grande es considerablemente menos denso. Recordemos que durante el día es el objeto que más brilla en el firmamento, de hecho su brillo es miles de millones de veces mayor que el del siguiente objeto celeste. Y es un reactor, pero no del tipo que conocemos mejor en la Tierra. Los reactores nucleares humanos son hasta el momento reactores de fisión cuyo combustible consiste en elementos pesados, como el uranio, cuyos núcleos atómicos contienen más de 200 protones y neutrones. En la fisión, el núcleo de uranio se divide en dos núcleos más pequeños, liberando en el proceso energía y algunos neutrones. Estos neutrones extras salen disparados como si fueran proyectiles balísticos y golpean otros núcleos de uranio, provocando a su vez su fisión, la liberación de más energía y neutrones, etc. Este efecto multiplicador hace que la reacción de fisión se desarrolle en cadena y fuera al principio relativamente difícil de estabilizar. En el interior de la Tierra también tenemos procesos espontáneos de fisión de materiales radiactivos, que al parecer contribuyen notablemente a la temperatura interior del planeta. En el Sol las cosas son diferentes: el proceso más habitual es el de la fusión.

En este caso lo que ocurre es que cuatro núcleos de hidrógeno, tras varios procesos intermedios, se fusionan para dar un núcleo de helio. Estas reacciones son *a priori* mucho más limpias que las de fisión, ya que no involucran elementos perjudiciales para la salud. Tanto el hidrógeno como el helio son inocuos.

Mediante estas reacciones de fusión el Sol irradia energía en todas direcciones, más o menos del mismo modo que un hierro candente lanza energía a su alrededor. Al no haber aire entre el Sol y el resto de planetas que le siguen, la energía no se transmite dentro del sistema solar mediante convección, que es lo más habitual en nuestro entorno de la superficie terrestre, sino que toda la energía se expulsa mediante radiación directa. La luz que nos llega del Sol es la que daría un cuerpo negro a 5778 K. El cuerpo negro es un objeto teórico que se usa como modelo aproximado del comportamiento radiativo de cuerpos como estrellas, bombillas de incandescencia y otros. El máximo de emisión del Sol nos llega en forma de luz de una longitud de onda de unos 580 nanómetros, que es un color anaranjado. No es casualidad que nuestros ojos sean particularmente eficaces en distinguir la luz en torno a esas longitudes de onda: la selección natural ha ido afinando el instrumento para que funcione donde más radiación hay.

Así pues, tenemos un núcleo irradiador, y a distancias variadas un conjunto de planetas inertes sin capacidad seria para generar energía por reacciones nucleares (aparte de nuestras pequeñas centrales nucleares y procesos de fisión natural). Aunque *a priori* parece que dependiendo de la distancia al Sol y del tamaño del planeta tendremos diferentes temperaturas, en realidad la presencia o no de atmósfera en este último juega un papel muy relevante. En objetos sin atmósfera, la diferencia entre cuando hay una exposición directa a los rayos solares y cuando no la hay producirá variaciones extremas de temperatura, como en la Luna. En planetas con atmósfera gaseosa las condiciones son más razonables.

Comencemos nuestra inspección de los planetas rocosos del sistema solar por el más cercano al Sol. Mercurio queda a unos 50 millones de kilómetros de nuestra estrella y soporta temperaturas extremas. De día, esto es, en la zona directamente iluminada por el Sol, estas llegan a los 700 K, mientras que en la noche te-

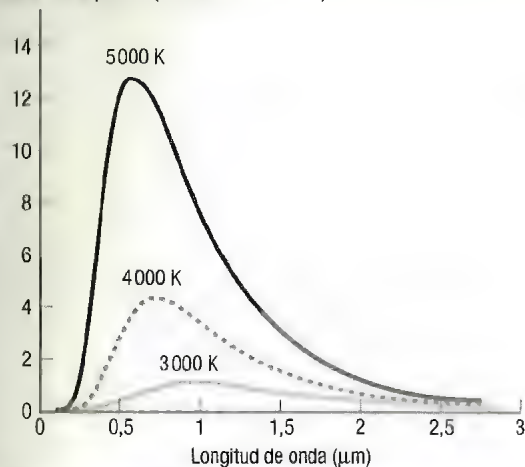
LA RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

En física se busca aislar lo importante de la física desordenada. Los fenómenos, así, un cambio a 100 km/h en la distancia para una velocidad, se puede simplificar en el siguiente ejemplo: un coche que por un objeto puntual, sin estructura, como es la distancia, se simplifica a un punto. En este caso, el coche más o menos se puede simplificar a un punto.

Obedeciendo a la ley de Planck

De forma similar a la simplificación de objetos puntuales, existe un caso paradigmático que es el concepto de cuerpo negro. Un cuerpo negro se puede describir como una caja con una cavidad de tal manera que al entrar un rayo de luz por el agujero rebota dentro de ella tantas veces que al final será completamente absorbido. Este concepto del cuerpo negro es una idealización, como la de la partícula puntual. La pregunta que podemos hacernos es: si ahora calentamos la caja y los átomos de esta comienzan a moverse, ¿empezará a irradiar luz, exactamente como una barra de hierro incandescente lo hace por haberse calentado lo suficiente? La respuesta correcta a la pregunta solo puede obtenerse en el marco de la mecánica cuántica y la consiguió el físico Max Planck. La ley de Planck nos dice la proporción de luz que tendremos en cada rango de frecuencias dependiendo de la temperatura del cuerpo negro. Lo divertido del asunto, como ocurre con el caso del ejemplo del coche, es que aun siendo una teoría, resulta que la mayoría de los objetos que irradian energía siguen aproximadamente la ley encontrada por Planck. Sencillamente, del color anaranjado del Sol podemos inferir con esta ley que la superficie solar está a algo más de 5000 K.

Radiancia espectral ($\text{kW} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)



Espectro de la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura de 5000 K, a otra de 4000 y a otra de 3000. En el gráfico se aprecia que a medida que la temperatura baja, el pico espectral se desplaza hacia longitudes de onda más largas y también disminuye la intensidad de la radiación.

temperaturas de tan solo unos 100 grados por encima del cero absoluto. Estos tremendos cambios son debidos a que no hay nada en Mercurio que regule mínimamente la temperatura, papel que en la Tierra juegan la atmósfera y la gran masa de agua oceánica. A algo menos del doble de distancia del Sol tenemos el segundo planeta, Venus. Este es extraordinariamente cálido, más incluso que Mercurio pese a estar más alejado del Sol, debido a la presencia de una densa capa de gases, dióxido de carbono principalmente, que producen un potente efecto invernadero. Para sorpresa de casi todos, en la parte externa de la atmósfera, a unos 120 km de altitud, se produce una abrupta caída de la temperatura hasta unos -175°C , como ha medido recientemente la misión Venus Express de la Agencia Espacial Europea.

Un «poco» más lejos, a casi el triple de distancia que Mercurio, tenemos la Tierra, que sufre unas oscilaciones térmicas mucho menos acentuadas que las de sus vecinos.

Marte, el siguiente a medida que nos alejamos de la estrella, aún mantiene en las regiones más cálidas unas temperaturas razonables, con mínimas y máximas parecidas a las que pueda tener una ciudad del norte de Europa. Mucho sabemos gracias a las recientes incursiones robotizadas en el planeta, en particular los vehículos autónomos como el Curiosity, el Opportunity y el Spirit. Gracias a su trabajo de años, reuniendo valiosos datos desde la superficie de Marte, se tiene constancia de que en las regiones exploradas hay temperaturas como las descritas, con máximas en torno a los 20°C y mínimas en torno a los -100°C .

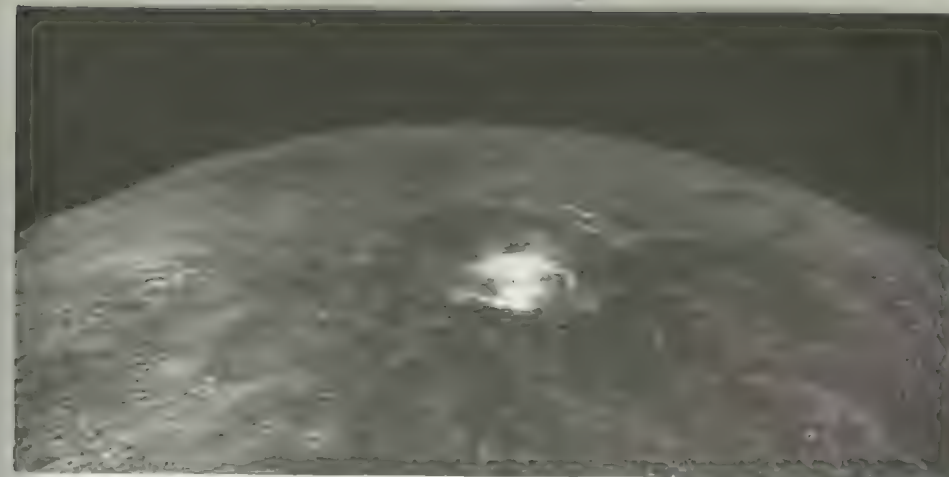
El frío extremo aparece a medida que nos alejamos del Sol y buscamos objetos casi inertes, sin prácticamente núcleo interior. Un buen ejemplo son los cuerpos que encontramos en el cinturón de asteroides del sistema solar. Este está al doble de distancia del Sol que Marte, y, aparte de infinidad de objetos rocosos, alberga cuatro con más masa que cualquier otro del cinturón. Dos de ellos están siendo estudiados bastante a fondo gracias a las recientes visitas a ellos hechas por la sonda espacial Dawn de la NASA: Vesta y Ceres. Con unos 500 km de diámetro el primero y 900 km el segundo, son esencialmente dos grandes rocas inertes, en el caso de Ceres rodeada de una capa de hielo, que vagan por

el espacio interplanetario y soportan en la superficie temperaturas típicas de entre -70°C y -140°C . La Dawn ha enviado gran cantidad de datos sobre Vesta y ahora mismo está explorando Ceres, intentando descifrar su estructura y composición (véase la imagen superior de la página contigua).

En los confines del sistema solar: Plutón y Caronte

A una distancia del Sol cuarenta veces mayor que la de la Tierra orbitan un par de objetos, el antes considerado planeta Plutón y su luna Caronte, junto con algunos pequeños satélites de aspecto asteroidal. Estos dos cuerpos forman un grupo binario, esto es, ambos orbitan alrededor de su centro de masas, o *baricentro*, que no está dentro de ninguno de ellos. Los vídeos tomados por la misión New Horizons de la NASA muestran con claridad una rotación completa de ambos alrededor de ese centro de masas. La Luna y la Tierra también orbitan alrededor de su baricentro, pero como nuestro planeta es casi 100 veces más masivo que su compañera, dicho baricentro está situado en el interior de la Tierra. Así, es la Luna la que esencialmente orbita alrededor de esta última. En el caso de Plutón y Caronte, el segundo tiene una masa unas diez veces menor que el primero, haciendo que ambos puedan considerarse más o menos en pie de igualdad.

Este conjunto Plutón-Caronte es verdaderamente inhóspito, con temperaturas en sus superficies del orden de los 50 K. Frío intenso, que hace que Plutón tenga una superficie compuesta en su mayor parte por hielo de nitrógeno. Recordemos que el nitrógeno es para nosotros habitualmente un gas, que de hecho respiramos, y que se licua a unos 77 K y se solidifica a unos 63 K. Los mares de nitrógeno helado son, sin duda, un paraje fascinante. Si las temperaturas son en general extremas, en los polos de Caronte es donde las encontramos tan frías que prácticamente no puede haber nada en estado líquido o gaseoso, no en vano estamos hablando de mínimas de unos 14 K (véase la imagen inferior de la página contigua). Recuerde el lector lo que comentábamos en el capítulo 2: la dificultad para disminuir la



Arriba, imagen tomada en la misión Dawn el 9 de diciembre de 2015 de un cráter del miniplaneta Ceres, del cinturón de asteroides. En la superficie de Caronte (izquierda), mostrado en esta foto tomada por la sonda espacial New Horizons, la temperatura media ronda los -225°C , y la más baja en los polos puede llegar hasta -259°C .

temperatura unos 30 °C y mantener la comida fresca; los dos siglos de intensa investigación para conseguir licuar, poco a poco, los gases que se iban descubriendo; la aparición de la mecánica cuántica para explicar entre otras cosas el comportamiento de la materia extraordinariamente fría. Y aquí tenemos una roca, en nuestro propio sistema solar, en cuya superficie fenómenos como la superfluidez deben darse de forma natural. El frío, de hecho, es tan intenso que hace que parte de los materiales gaseosos que escapan de Plutón sean atrapados por las zonas polares de Caronte, donde se supone que pasan directamente a solidificarse. Los científicos pendientes de esta misión de la NASA están estudiando qué fenómeno produce los tonos anaranjados observados. Y es solo el principio, pues en los próximos años nos irán llegando más y más datos de todos los rincones del sistema solar que nos permitirán ir comprendiendo las distintas reacciones que se dan en condiciones tan extremas.

Plutón y Caronte están en la periferia lejana del sistema solar. La sonda espacial Voyager-1 que lleva viajando nada menos que desde 1977, se halla ahora mismo en el espacio interestelar, pero sus reservas de energía están ya notablemente bajas y no podrá informar durante mucho más tiempo sobre lo que encuentre a su paso. Cuando ya no pueda comunicarse con la Tierra, habremos de esperar bastante hasta disponer de otra oportunidad de saber de primera mano qué sorpresas nos depara dicho espacio interestelar. Entretanto seguiremos escudriñando el cielo desde nuestro planeta.

FRÍO EN EL UNIVERSO

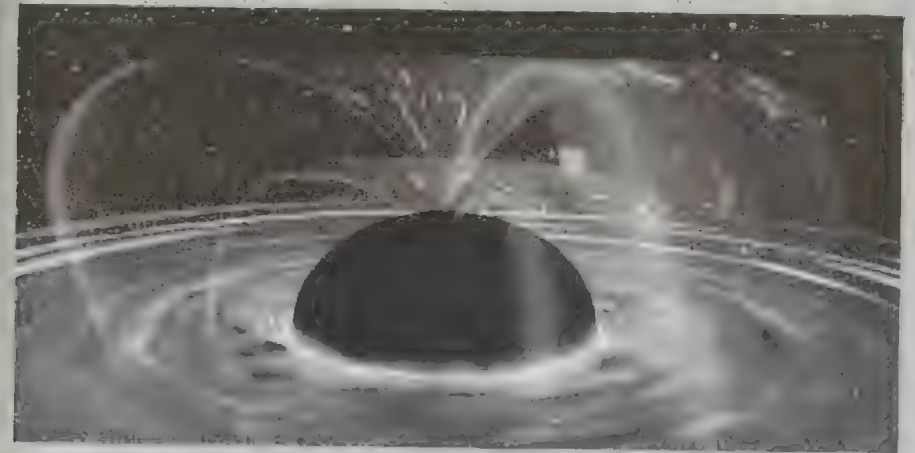
Observando el cielo nocturno, lo primero que percibimos es la gran oscuridad, siempre que no estemos cerca de un núcleo urbano. Aparte de negrura, podemos ver la Luna, así como muchos puntos de luz, algunos bastante brillantes como Venus, y otros más tenues, que son planetas más lejanos y estrellas. Esta descripción, con la que es previsible que todos estemos de acuerdo y que normalmente no suscita controversia, llamó poderosamente

LA TEMPERATURA DE LOS AGUJEROS NEGROS

Probablemente, la temperatura más baja que se haya teorizado hasta ahora sea la de los agujeros negros supermasivos. Un agujero negro es más o menos como un cuerpo negro, en el sentido de que la luz que llega a otro objeto, no salen. Esencialmente se trata de una zona del espacio con tanta masa gravitatoria que nada puede escapar de la fuerte atracción de la gravedad. Ni la luz, ni objetos; nada en absoluto. A la zona a partir de la cual nada puede ya escapar se la denomina *horizonte de sucesos* del agujero negro. Aunque la idea no es nueva, pues ya la propuso el físico John Michell en 1783, solo a mediados del siglo xx dejó de ser una curiosidad para comenzar a convertirse en una realidad medible. Hoy día se considera establecida la existencia de agujeros negros, incluyendo los supermasivos, con masas capaces de superar ampliamente un millón de veces la del Sol, uno de ellos en el centro de nuestra propia galaxia. Se sabe que existen porque, aunque no se ven, sus efectos son notables en las estrellas de su entorno.

Radiación extremadamente fría

En la década de 1970, Stephen Hawking planteó la hipótesis de que, aun siendo negros, si que debían emitir una radiación, aunque extraordinariamente tenue, propiciada por efectos cuánticos en el horizonte del agujero. El físico británico predijo que esta radiación sería como la emitida por un cuerpo negro que estuviera a una temperatura inversamente proporcional a la masa del agujero. Por expresarlo con números: si tenemos un agujero negro tan masivo como nuestro Sol, la temperatura de la radiación sería parecida a la del condensado de Bose-Einstein más frío que se haya producido, unas decenas de nanokelvins. La temperatura del agujero supermasivo en el centro de nuestra galaxia debe de ser de unos 10^{-14} K. Por ahora no somos capaces de detectar nada semejante, aunque ¡tiempo al tiempo!



Recreación artística de un agujero negro y su entorno inmediato.

te la atención del astrónomo alemán Heinrich W. Olbers en el siglo XIX. Para Olbers, si se pensaba que el universo era infinito, estático y más o menos uniformemente poblado por estrellas, deberíamos ver todo el firmamento cubierto de luz y no solo algunos destellos. Este concepto es la *paradoja de Olbers*, cuya resolución habitual es considerar que de hecho el universo no es infinito sino que tiene una cierta extensión. Aun teniendo una extensión finita, la segunda observación es que, aunque hay muchas estrellas en el firmamento, la mayor parte del espacio está vacío de ellas. Es decir, en general, no hay gran cosa. Lo que sí parece estar omnipresente en el universo es la radiación.

En otras palabras, casi todo está vacío de materia, pero hay bastante radiación. Tenemos fuentes obvias de radiación, como las estrellas, que envían ondas electromagnéticas en una gran parte del espectro, desde el visible hasta el ultravioleta o los rayos X. Hoy se escruta el cosmos empleando desde la radioastronomía, con longitudes de onda más largas que 1 mm y que permiten ver gas interestelar, supernovas y estrellas pulsantes, hasta la astronomía de rayos gamma, con longitudes de onda del orden del tamaño del núcleo atómico. Con esta última técnica se pueden estudiar las mayores explosiones que tienen lugar en el universo, las supernovas, que ocurren cuando las estrellas consumen todo su material nuclear. En ese momento dejan de producir energía nuclear en el interior, por lo que no pueden soportar la presión gravitatoria ejercida por el material que forma la estrella. El siguiente paso es inevitable: el material comienza a caer hacia el núcleo, sufriendo una gran implosión seguida de una gran explosión en la que grandes chorros de energía se envían al espacio. Lo que queda del núcleo de la estrella a veces se convierte en un agujero negro, un objeto con una gravedad tan intensa que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de su interior.

Radiación de fondo cósmico de microondas

Una de las más fascinantes radiaciones que podemos detectar es la radiación de fondo cósmico de microondas (*Cosmic Mi-*

crowave Background en inglés, o CMB por sus siglas en ese idioma). Su interés fundamental se debe a que hoy día es considerada como la radiación más antigua del universo. Dentro de la teoría del Big Bang, esta radiación se explica como aquella que viene de la época en la que los electrones y los núcleos empezaron a ligarse para formar átomos. La radiación no se observa en el rango visible: si uno apunta el telescopio a huecos entre estrellas ve solamente oscuridad. Sin embargo, si hace lo mismo con radiotelescopios se observa una suerte de señal tenue pero continua. La señal es máxima en el rango de las microondas y *a priori* es completamente isotrópica, esto es, no cambia si en lugar de apuntar en una dirección apuntamos en otra.

De una manera esquemática, el universo primigenio debía de estar compuesto de un plasma en continua y rápida expansión. Todo esto ocurrió mucho antes de la formación de estrellas o galaxias. Al irse expandiendo, el plasma se fue progresivamente enfriando, siendo aún tremendamente opaco. Durante ese proceso, las partículas formaron primero núcleos, que bastante más tarde se combinaron con electrones para formar átomos. A este fenómeno se le denomina *recombinación*, aunque estrictamente hablando el prefijo «re» no debería aparecer ya que no se habían combinado antes. La densidad en ese momento cayó bruscamente y no pudo seguir conteniendo la radiación térmica. De alguna manera en ese instante escapó la radiación contenida y se expandió por el universo, llevando impresas en su espectro las propiedades que tenía este en ese periodo. La radiación de fondo es como una fotografía del modo en que estaba distribuido el material en el tiempo de la recombinación.

Esta radiación de fondo es compatible con la que irradiaría un cuerpo negro a 2,7 K. ¿Por qué está tan fría si inicialmente el universo estaba tremendamente caliente? La respuesta está en que nuestro universo se halla en continua expansión desde los tiempos del Big Bang, como indica el hecho de que la mayor parte de las galaxias observadas parecen alejarse de nosotros. Si el universo se expande, la longitud de onda de cualquier radiación, en particular la de fondo, habrá ido aumentando con el tiempo. Si la longitud de onda, distancia entre dos crestas de la onda,

aumenta, tendremos que la frecuencia tiene que disminuir. Una disminución de frecuencia acarrea una bajada de la energía y por tanto de la temperatura. El bajo valor de la temperatura medido es pues debido a la expansión del universo, ni más ni menos.

Si la radiación observada, tenue, pero constante y uniforme en todas las direcciones del firmamento, es como una foto del uni-

verso caliente y primigenio, ¿qué dice la fotografía? ¿Cómo era ese universo? Para responder a esta pregunta, la distribución de la radiación de fondo cósmico tiene que presentar algún

El cambio es raramente cómodo.

ARNO PENZIAS

tipo de diferencia dependiendo de la dirección. Si en una fotografía todo es del mismo color, no vemos nada, y no hay mucha información que extraer. Para que contenga información debe tener contraste. Esto es, algunas zonas de la foto han de tener un color diferente del de otras, reflejando el paisaje retratado. Al mejorar las técnicas con las que se mide la radiación de fondo de microondas, en particular con los satélites y globos, se fueron viendo pequeñas diferencias dependiendo de la dirección. A estas se las denomina *anisotropías*. Un objeto es isótropo si no cambia dependiendo de la dirección, así, desde el centro de una esfera, todo el globo es completamente isótropo. Si nuestro planeta fuera una bola de cristal transparente y estuviéramos en el centro y pudiéramos ver la superficie, observaríamos anisotropías debidas a los diferentes continentes, mares, islas, etc. En este caso lo que se ha medido son diferencias de intensidad de 1/100 000 dependiendo de la dirección.

El mapa que se conoce ahora mismo tiene una resolución muy fina. En las figuras 1, 2 y 3 mostramos tres mapas distintos: el primero (figura 1) es una simulación de lo que hubieran medido Penzias y Wilson, los descubridores, con su antena. Observarían todo de un color uniforme, y una zona diferente en dirección al plano de nuestra galaxia. El segundo (figura 2) es el que midió el satélite COBE. En él ya se observan claras zonas de diferente temperatura. El mapa muestra diferencias respecto del valor medio, con variaciones del orden de 0,00001 K. El tercero (figura 3) es el más reciente de los tres, confeccionado por la colaboración

FIG. 1

Simulación del mapa que habrían obtenido Penzias y Wilson de la radiación de microondas si hubieran rastreado todo el firmamento mediante la antena con la que descubrieron la radiación.



FIG. 2



Mapa obtenido por la colaboración COBE, primera en observar claras anisotropías. De hecho, en esta imagen se muestran las diferencias respecto del valor medio de 2,725 K. La gran banda central de bordes irregulares e interior homogéneo corresponde a las emisiones de microondas provenientes de nuestra propia galaxia y no de la radiación de fondo.

Mapa obtenido por la colaboración internacional WMAP tras nueve años recopilando datos, de las pequeñas anisotropías de la radiación de fondo de microondas. En la imagen, la zona ecuatorial, muy rica en fuentes de microondas de nuestra propia galaxia, ha sido desprovista de estas para dejar solo la radiación de fondo real.

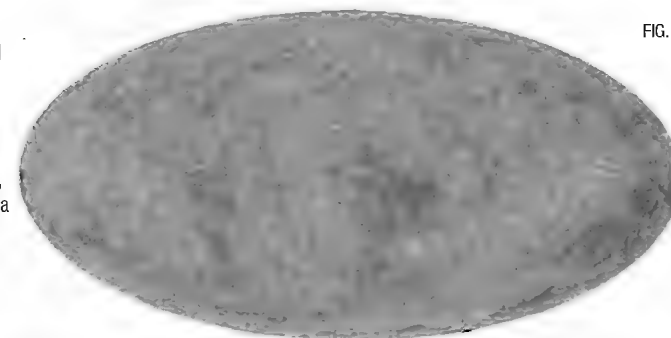
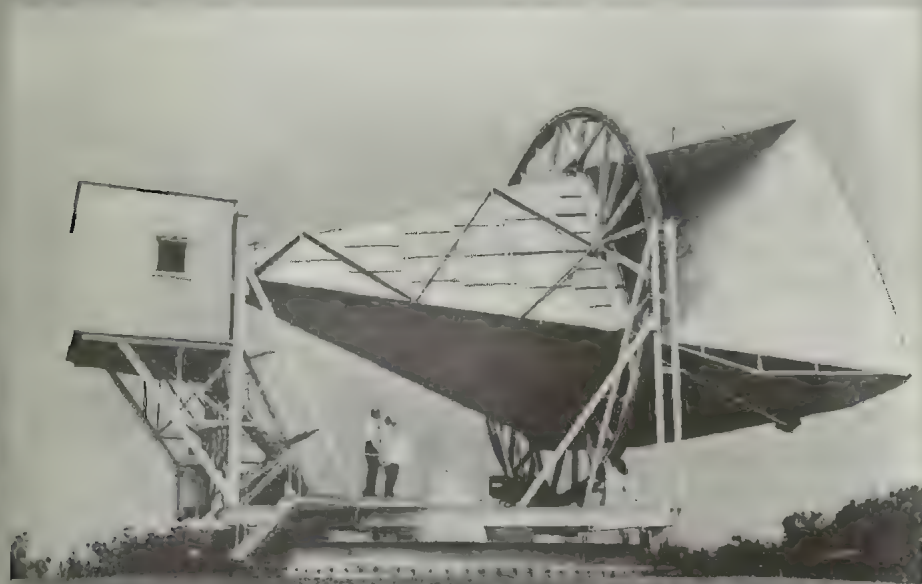


FIG. 3

EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACIÓN DE FONDO DE MICROONDAS

En el año 1964, los científicos de los Laboratorios Bell estadounidenses Arno Penzias y Robert Wilson estaban trabajando en una antena superconductora para detectar ondas de radiación electromagnética de globos aerostáticos. La antena, de unos 2 m de diámetro, tenía que detectar una débil radiación, lo que requirió ir eliminando todos los factores que pudiesen dar ruido. Para ello los científicos que usaban la antena a muy bajas temperaturas, al cero absoluto, a fin de evitar cualquier ruido de vibraciones de ella misma. Con el instrumento realmente templado, vieron que recibían una misteriosa radiación a una frecuencia muy precisa. Era nada menos que ondas de radio más intensas de lo que se pensaba y la fuerza de la señal no dependía de si era de día o de noche o de en qué dirección dirigían la antena. Llegaron a la conclusión de que esta señal de radio debía tener origen extragaláctico. A pocos kilómetros de su laboratorio, un grupo de cosmólogos había teorizado la existencia de una radiación de características similares a la de Penzias y Wilson, que sería el «eco» del Big Bang. En muy pocas palabras, en el origen de los tiempos y del espacio, todo estaba concentrado en un punto. Hubo entonces una gran explosión, que liberó una gran cantidad de energía, y a medida que el tiempo avanzó, se formaron algunas partículas que inicialmente no dejaban escapar la radiación. Al inflarse el espacio, la materia se hizo menos densa y la radiación vinculada a la explosión primigenia escapó. Esta radiación era la que midieron, sin saberlo entonces, los investigadores de los Laboratorios Bell.



La antena con la que Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron la radiación de fondo de microondas.

Las anisotropías de la radiación de fondo de microondas

Penzias y Wilson descubrieron con su antena una radiación que era esencialmente isotrópica, esto es, era la misma independientemente de en qué dirección apuntaran la antena. Esta radiación, además de ser mayormente isotrópica, encajaba a la perfección con la radiación esperada para un cuerpo negro. Pero, si la radiación procedía de cuando la luz escapó de la cavidad cósmica, lo más probable era que todas las imperfecciones de esta hubiesen quedado reflejadas en la radiación. De este modo, se empezó a elucubrar que las diferentes densidades que hubiera poco tiempo después del Big Bang, y que después dieron lugar nada menos que a cúmulos de galaxias, podrían reflejarse en ligeras anisotropías de la radiación. Estas anisotropías fueron confirmadas después hasta en una parte por cada diez mil. Primero fue el experimento COBE (*Cosmic Background Explorer*) en la década de 1990, con un satélite dedicado exclusivamente a cosmología, el que produjo un mapa de las anisotropías de la radiación. Tras las medidas del COBE se utilizaron globos aerostáticos para mejorar la precisión de medida de las anisotropías en algunas regiones del mapa. Confirmado y mejorado cuantitativamente por el experimento WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), hoy día la estructura del fondo de microondas es un campo fascinante en el que cosmólogos de toda condición pueden poner a prueba sus teorías más pintorescas y confrontarlas con datos experimentales cada vez más precisos.



Ilustración artística del WMAP, mostrado en una fase de su misión.

WMAP, y constituye el resultado de ir acumulando datos durante nueve años de observación. Una información muy valiosa de este mapa es el tamaño característico de las manchas. Observamos que al pasar de COBE a WMAP, pasamos de una imagen más gruesa a una mucho más fina, como si hubiéramos pasado de una fotografía borrosa a una mucho más nítida. Un aspecto importante, capital, es que ambas sean compatibles. Esto es, que una y la otra reflejen la misma estructura, aunque con diferente precisión. De esta forma sabemos que estamos avanzando correctamente en nuestro conocimiento de uno de los pocos rasgos observables que nos llevan directamente a tiempos del pasado más remoto del universo.

El frío en las fronteras de la ciencia

Mejorar nuestra capacidad de enfriar ha sido uno de los desarrollos tecnológicos que más nos ha ayudado a comprender nuestro entorno y a nosotros mismos. Son múltiples las fronteras de la ciencia en las que el frío absoluto es necesario para poder progresar.

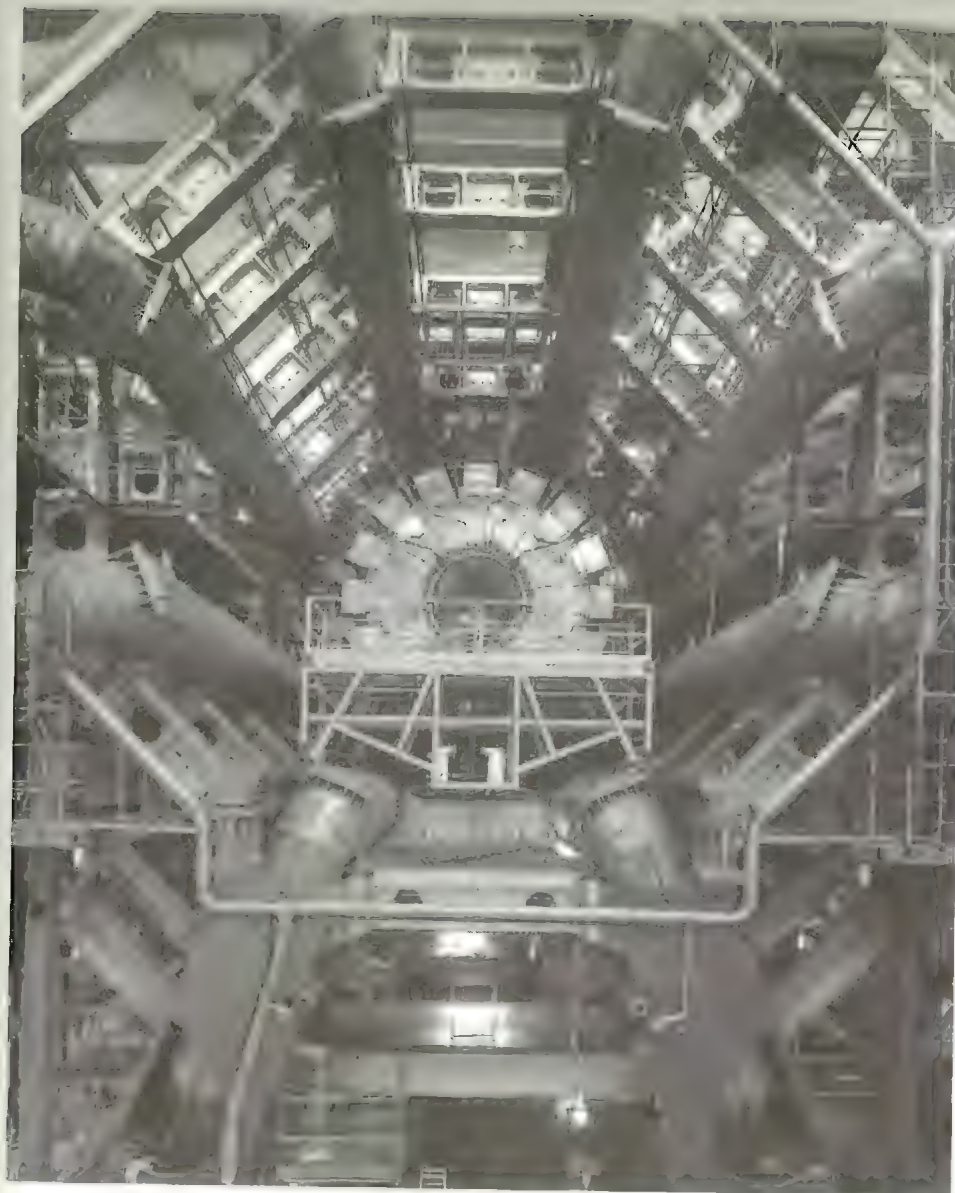
Como hemos ido viendo a lo largo del libro, la frontera del frío absoluto ha estado ligada a importantes avances conceptuales, en particular a la física cuántica, incluyendo estados de la materia impensables, como el condensado de Bose-Einstein. Al mismo tiempo, el frío extremo juega un papel fundamental en el descubrimiento de otros muchos fenómenos. Veremos en este capítulo ejemplos donde enfriar es un requisito fundamental para poder obtener nuevos conocimientos científicos. El primero es el caso del mayor y más potente acelerador de partículas del mundo, el LHC (por las siglas en inglés de *Large Hadron Collider*, «gran colisionador de hadrones») de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN son sus siglas en francés). En él se necesita el frío para acelerar las partículas. El segundo es un avance conceptual: las transiciones de fase cuánticas, observadas recientemente en laboratorios de gases ultrafríos en los que el control sobre los átomos y sus interacciones es espectacular. El tercer ejemplo es el de los futuros computadores y simuladores cuánticos, que necesitan operar a muy bajas temperaturas para poder beneficiarse de la mecánica cuántica, superando ampliamente las limitaciones actuales de la compu-

tación. Finalmente, el cuarto ejemplo es el de las técnicas de criogenización, que prometen conservar la vida más allá de los plazos a los que estamos habituados.

COLISIONES DE PARTÍCULAS GRACIAS AL FRÍO

En el corazón de Europa, entre las fronteras de Francia y Suiza y a unos 100 m de profundidad, encontramos el mayor esfuerzo colaborativo realizado hasta ahora por la humanidad para avanzar en el conocimiento científico. El CERN es una instalación singular en la que participan 21 países y trabajan unos 2500 científicos consagrados a buscar y comprender las partículas más elementales de las que está hecho el universo. La idea subyacente en el método de investigación es relativamente sencilla: partículas cargadas se aceleran hasta que adquieren una gran energía y después se las hace chocar contra otras partículas. De esta manera, de estas colisiones altamente energéticas emergen múltiples partículas nuevas, ¡billones!, y huellas que los científicos intentan caracterizar y entender comparándolas con las predicciones de las teorías físicas actuales. El método puede parecer algo burdo, ya que de alguna manera es como intentar entender de qué está hecho un violín lanzándolo contra una pared a gran velocidad. Ciertamente, descubriremos de qué está hecho, los átomos que lo componen, pero perderemos toda la información estructural, que es lo que hace que esos mismos átomos sean un violín y no una oveja.

Para ser más precisos, en el LHC del CERN los objetos a los que se hace colisionar son partículas como iones y protones, y lo que se pretende con ello es que se generen otras, como podrían ser los quarks, las partículas responsables de la radiactividad o el famoso bosón de Higgs. Las partículas iniciales necesitan acelerarse hasta alcanzar energías que permitan producir partículas todavía desconocidas o poco estudiadas. El LHC comenzó en 2013 una fase de operaciones con haces produciendo colisiones a 7 TeV (teraelectronvoltios, es decir, un millón de voltios); en 2016 casi se ha doblado dicha energía. Aunque es mucha, equi-



Las grandes barras o tubos que convergen en el centro de la foto del detector ATLAS del CERN son electroimanes superconductores. Para funcionar requieren una temperatura bajísima, de unos pocos grados por encima del cero absoluto.

vale más o menos a la energía de un mosquito algo lento. Visto así, no impresiona mucho, parece muy poca energía: ¿qué nos estamos perdiendo? La diferencia es que el LHC consigue concentrarla toda en un espacio un billón de veces menor.

Es en el proceso de acelerar las partículas que chocan en el anillo del CERN donde entran en juego las temperaturas ultrafrías. El método es más o menos el siguiente: supongamos que lo que queremos es tener protones extraordinariamente energéticos. Una forma de lograrlo es conseguir que vayan tan rápido que su energía cinética alcance el valor que nos interesa. Esto implica que necesitamos acelerar los protones, partículas con carga electromagnética positiva y una masa de unos 10^{-27} kg, para lo cual tenemos dos opciones. La primera sería dejarlos caer, como si de la manzana de Newton se tratara, atraídos por la gravedad terrestre. Una vez que hubieran caído durante suficiente tiempo los haríamos colisionar contra otros protones. Esto es impracticable, ya que necesitaríamos construir un gran pozo imposible por el que cayeran los protones hasta alcanzar las energías que buscamos. La segunda opción es aprovechar que tienen carga eléctrica para acelerarlos al someterlos a campos electromagnéticos.

Este mecanismo era el mismo que se usaba hasta hace pocos años en los tubos catódicos de los televisores domésticos, donde había una diferencia de potencial eléctrico muy grande entre dos placas que hacía que los electrones saltaran formando un cañón de electrones, que era el que iba conformando la imagen en el televisor. En el caso del LHC, la energía que necesitamos es tal que no podemos conseguirla con una sencilla diferencia de potencial sino que se necesita acelerar las partículas haciéndolas girar en un circuito. En las zonas rectas las vamos acelerando mediante diferencias de potencial, de forma que cada vez que dan una vuelta van aumentando su energía. A más energía, más difícil es girar, del mismo modo que al tomar una curva en coche a alta velocidad, si esta no está peraltada necesitaremos que tenga un radio muy amplio para poder negociarla. Si vamos a baja velocidad podemos hacerlo con mayor facilidad.

He aquí pues el problema: ¿cómo hacemos que partículas tan energéticas giren en un anillo relativamente pequeño (de 27 km

de circunferencia)? Necesitaremos grandes campos magnéticos que consigan desviar los haces de partículas con la curvatura que buscamos. Este efecto está en la raíz de la relación intrínseca entre fuerzas eléctricas y magnetismo, unificadas por James Clerk Maxwell a finales del siglo XIX. Por ejemplo, podemos obtener un imán pasando corriente eléctrica por una bobina enrollada, algo que se utiliza en los timbres eléctricos y en multitud de utensilios. De modo análogo, una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético intenta doblarse. Para poder curvar los haces de protones necesitamos campos magnéticos

tan intensos que solo pueden producirse gracias a las grandes corrientes que pueden fluir casi sin resistencia en materiales superconductores. Como vimos en el capítulo 2, desde el descubrimiento de Kamerlingh Onnes de la superconductividad a temperaturas de pocos kelvins, se han hallado diversos materiales con propiedades superconductoras a temperaturas que no suelen ser más altas que unas pocas decenas de kelvins. Esto hace que en el LHC, para poder descifrar los secretos más íntimos de la materia, necesitemos gran cantidad de frío prácticamente absoluto. No deja de ser paradójico que para producir las grandes temperaturas que caracterizan las colisiones entre hadrones en el acelerador sea necesario utilizar las temperaturas más bajas conocidas. Puede parecer un problema menor, pero no lo es; por este motivo, todo el anillo del LHC necesita estar continuamente a temperaturas del orden de los 2 K, lo que implica grandes cantidades de helio líquido.

A principios de la década de 1950, las energías alcanzadas por el LHC se habrían considerado propias de la ciencia ficción, pero, gracias a los avances en ciencia y tecnología de los aceleradores, ahora son reales.

JOHN JOWETT

TRANSICIONES DE FASE CUÁNTICAS

En nuestro día a día estamos constantemente poniendo a prueba las propiedades físicas de la materia. Un caso sencillo y paradig-

CAMMION: IN ISLAND

El agua puede estar en estado líquido, sólido o gaseoso, pero en la naturaleza, casi siempre, es líquida. Sin embargo, también puede estar en estado sólido, como el hielo, o en estado gaseoso, como el vapor de agua. El agua puede cambiar de estado de agregación, es decir, pasar de un estado a otro, por ejemplo, de líquido a sólido, de líquido a gaseoso, o de sólido a gaseoso. Estos cambios de estado se producen por la acción de la temperatura y la presión. El agua puede pasar de líquido a sólido cuando la temperatura disminuye lo suficiente, o cuando la presión aumenta lo suficiente. El agua puede pasar de líquido a gaseoso cuando la temperatura aumenta lo suficiente, o cuando la presión disminuye lo suficiente. El agua puede pasar de sólido a gaseoso cuando la temperatura aumenta lo suficiente, o cuando la presión disminuye lo suficiente. Los cambios de estado del agua son importantes en la naturaleza, y tienen muchas aplicaciones en la tecnología y la industria.

La magia del punto triple

Por lo tanto, hay unos valores de presión y temperatura en los que coexisten las tres fases; este punto se denomina *punto triple*, y tiene lugar en el agua a una presión de 0,006 atmósferas y una temperatura de 0,1 °C. El otro punto relevante es el *punto crítico*, a partir del cual la transición de líquido a vapor tiene lugar de una forma completamente diferente a la que estamos acostumbrados. Normalmente, si tenemos agua líquida y la calentamos, a 1 atm, por encima de 100 °C, el líquido comienza a evaporarse poco a poco, formando burbujas de gas que escapan. La temperatura del líquido no crece durante la transición de fase y no vuelve a aumentar hasta

En Marte, el agua cambia normalmente entre el estado sólido y el gaseoso, sin pasar por el líquido, debido a la baja presión atmosférica allí reinante.

que todo se ha convertido en algo tan simple como apretando el botón. En estos casos las distintas fases son diferentes grados de orden: desordenado, amorfo y perfectamente ordenado. Existen otras transiciones de fase; por ejemplo, al tomarnos un manojito de pajitas para beber y las apretamos con la mano, pasan de ser circulares a hexagonales a una presión determinada. Este cambio estructural es lo que marca la transición de fase. Existe una teoría general de transiciones de fase que las cataloga dependiendo de cómo cambien las propiedades al variar aquella responsable del cambio de fase: la temperatura si se trata del agua, la presión en el caso de las pajitas.

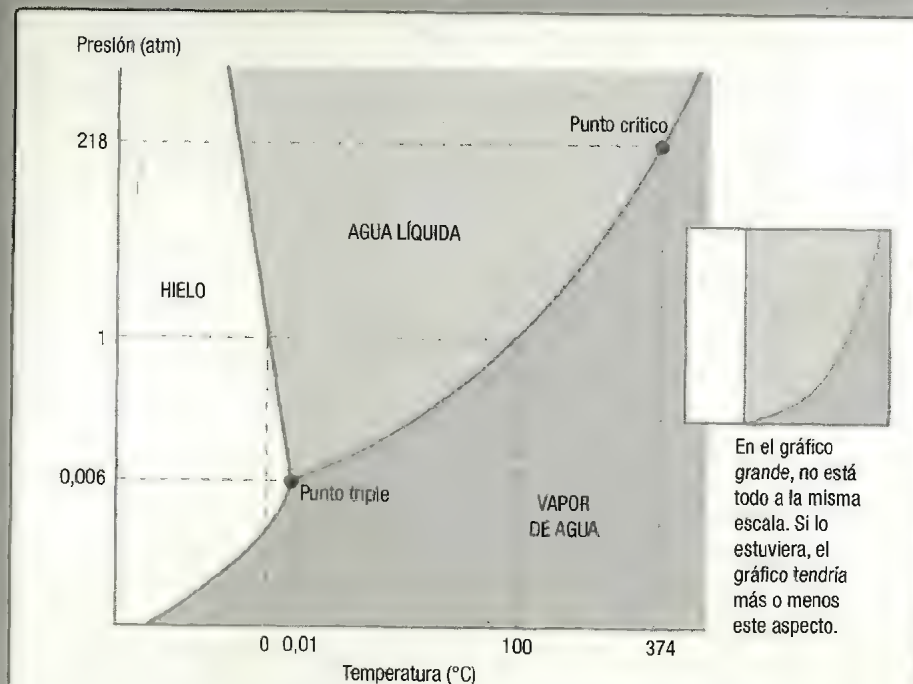


Diagrama de fases del agua. El eje de abscisas señala la temperatura en grados centígrados en una escala no lineal para mostrar todos los aspectos relevantes. El eje de ordenadas señala la presión en atmósferas. Las diferentes regiones indican el estado en que se encuentra el agua dependiendo de la presión y la temperatura. Por ejemplo, a 100 °C y 1 atm de presión (la presión habitual a la que estamos sometidos sobre la superficie de la Tierra a nivel del mar), el agua es gaseosa. Al aumentar la presión por encima de 1 atm el gas se licua, transformándose en agua líquida. Obsérvese que a presiones muy bajas, menores de 0,006 atm, el vapor de agua se transforma directamente en hielo al enfriarse, y el hielo se sublima a gas directamente al calentarse. Esto ocurre por debajo del denominado punto triple.

mático es el de calentar un cazo de agua para hacer una infusión. En este caso, al hervir el agua, observamos lo que se conoce como una transición de fase, en la que las moléculas de agua pasan de formar un líquido a evaporarse en forma gaseosa. Las moléculas son idénticas en ambos casos, H_2O , con exactamente la misma estructura. ¿Qué ha cambiado? Hemos permitido, al calentar, que las moléculas de agua se separen unas de otras, lo que hace que esencialmente se comporten en el caso gaseoso como si estuvieran solas, chocando unas con otras con mucha menos frecuencia que en el caso líquido en el que están en contacto permanente. De hecho, una forma de estudiar qué ocurre es medir a qué distancia promedio de una molécula encontramos otra molécula. Esto proporciona una medida de la correlación entre ellas. Por ejemplo, si las moléculas formaran un sólido estarían distribuidas, *grosso modo*, como los huevos en una huevera. En este caso, tenemos una probabilidad muy alta de encontrar un huevo a unas distancias características mientras que a otras no lo encontraremos nunca. En el caso de los líquidos es menos drástico; si tenemos una molécula, hay una alta probabilidad de que encontremos una segunda a una cierta distancia de la primera. Más lejos, básicamente encontrar o no a una molécula es independiente de dónde estuviese la primera.

Las transiciones de fase son fundamentales en física, se deben a cambios estructurales y proporcionan una información muy valiosa acerca de la estructura microscópica. También son interesantes desde un punto de vista matemático. En las transiciones de fase aparecen comportamientos singulares, con funciones que se hacen infinitamente grandes o discontinuas al acercarse a la zona de la transición. Por ejemplo, si estudiamos la temperatura del agua a medida que proporcionamos calor al cazo veremos que va subiendo progresivamente hasta que alcanza los 100 °C. En ese punto, la temperatura deja de crecer hasta que todo el líquido se ha transformado en gas, y en este momento, vuelve a subir si seguimos calentando.

Las transiciones de fase clásicas suelen seguir el mismo patrón. Al cambiar una propiedad, en muchas ocasiones la temperatura, cambian las propiedades de interconexión de los componentes


dando lugar en algunos casos a cambios abruptos de estructura que dan lugar a su vez a transiciones de fase. En el mundo cuántico que estamos explorando también existe un concepto similar, el de transiciones de fase cuánticas que solo tienen lugar a temperaturas del orden de los nanokelvins. Este es un concepto relativamente reciente. Al igual que en las que hemos descrito, vamos cambiando algún parámetro o propiedad y las características estructurales del sistema cambian cualitativamente para un cierto valor del parámetro.

El caso más claro y sencillo desde el punto de vista conceptual ha sido el estudio de la transición entre *aislante de Mott* y superfluido realizado por el grupo del profesor Markus Greiner en 2002. En este laboratorio de átomos ultrafríos eran capaces de preparar los átomos en una red, como si de huevos en una huevera se tratara, lo que se ilustra en las figuras 1 y 2, que muestran una transición de fase entre un estado superfluido (figura 1) y un estado aislante (figura 2) en un sistema de átomos ultrafríos. Si la altura de las barreras entre cada zona de la huevera es muy grande, es de esperar que cada átomo se comporte como si estuviera

FIG. 1



En un estado superfluido, todos los átomos están en el mismo estado cuántico. Los picos en el diagrama de la derecha indican que la forma en que se mueven los átomos de los sitios de la red está correlacionada. A modo de ejemplo, si los átomos fuesen canicas, se dispondrían en la huevera del dibujo de la izquierda del modo en que aparecen, es decir, habría var os juntos en un sitio, mientras que otros espacios quedarían vacíos.



En un estado aislante, tenemos un átomo en cada sitio de la red, por lo que las canicas aparecen bien repartidas en la huevera, cada una en un sitio distinto, como muestra el dibujo de la izquierda. El movimiento de cada uno de los átomos es completamente independiente del resto, y el resultado mostrado en el diagrama de la derecha es un patrón sin ningún pico visible.

aislado del resto, sin tener información de los de al lado. En este caso, si medimos propiedades de los átomos en el sistema tendremos que algunos harán una cosa, mientras otros estarán haciendo la contraria. Al medir, observaremos una suerte de conjunto aleatorio sin ningún orden. Más o menos sería como poner a un grupo de personas a bailar en una sala, cada una de ellas con sus auriculares y escuchando una música completamente diferente. Observaríamos movimientos en cada bailarín pero ninguna coordinación o sincronía entre ellos.

En el caso cuántico, a este estado se le denomina aislante de Mott. Al hacer cada miembro un movimiento sin ninguna relación, el conjunto no es capaz de trasladar ninguna información entre las diferentes zonas de la sala de baile. Sin embargo, si conseguimos que los bailarines sigan la misma melodía observaremos que sus movimientos comienzan a tener relación, de forma que si por ejemplo un individuo sube un brazo una gran parte de ellos realiza el mismo movimiento. Para que esto ocurra tiene que haber algo que correlacione a los individuos: puede ser la música que escuchan o también podría ser el que se observen al bailar, con lo que algunos imitarán a otros apa-

reciendo así una correlación entre los movimientos de todos ellos. Para el experimento de Greiner y sus colaboradores, bajar progresivamente las barreras entre los huecos de la huevera llevaría a la transición de Mott a superfluido. Para un valor característico de la altura de la barrera el sistema pasa de ser como los bailarines inconexos a ser un conjunto perfectamente armonioso en el que todos los átomos siguen la misma melodía. De hecho, la fase superfluida no es más que un condensado de Bose-Einstein.

El experimento del equipo de Greiner fue la primera demostración fehaciente de la existencia de transiciones de fase cuánticas. En él hicieron lo siguiente: cambiaban la altura de las barreras y, tras dejar equilibrar el sistema, las quitaban todas y medían las velocidades de los átomos. Si el estado es superfluido, los átomos actúan como un todo y obtenemos un patrón de difracción con picos claros. Si, por el contrario, el estado del sistema es aislante, al medir las velocidades no aparece ningún pico que muestre que muchos átomos van a la misma velocidad, es decir, no hay comportamiento colectivo.

COMPUTADORES Y SIMULADORES CUÁNTICOS

Otra frontera actual en la que interviene el frío es la de la computación y simulación cuánticas. En las últimas dos décadas se ha realizado un gran esfuerzo para diseñar y, en última instancia, construir máquinas que permitan realizar cálculos aprovechando las propiedades peculiares de la mecánica cuántica. En particular, entre las aplicaciones más claras de estas máquinas tendríamos el simular las propias teorías y modelos basados en la física cuántica, que presentan dificultades insalvables para ser estudiados con computadores normales en tiempos razonables. Entre los nombres famosos que pusieron en marcha este campo de investigación tenemos al archiconocido Richard P. Feynman, galardonado con el Nobel de Física en 1965 nada menos que por entender la fuerza electromagnética dentro del marco de la mecánica cuántica. Feynman, a principios de la década de 1980, ya

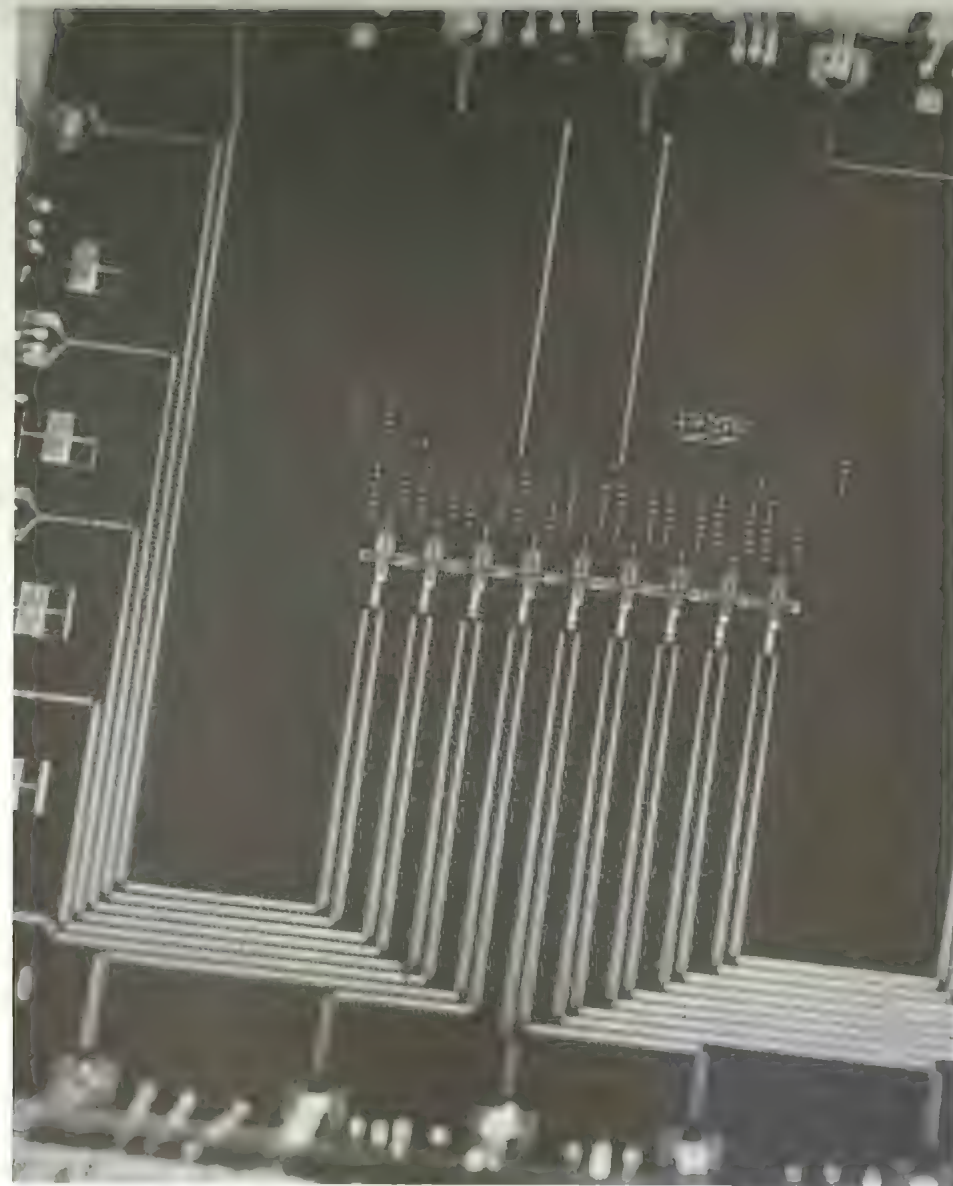
hablaba de construir un ordenador cuántico universal y de la importancia capital que tendría dicho logro para poder avanzar en las predicciones de las teorías cuánticas.

Idealmente se trataría del equivalente a los ordenadores actuales, pero con componentes (procesadores, memorias, etc.) que serían cuánticos (véase la imagen de la página contigua). Con estos ordenadores cuánticos se podrían resolver múltiples problemas, ya fuesen sistemas de ecuaciones diferenciales, tensiones estructurales en un edificio o la descomposición de cualquier número en sus factores primos. Además, deberían poder ser programados con lenguajes estándares de hoy día, como son C++, Python o Fortran. Los problemas mencionados aparecen a menudo en teorías clásicas, como la mecánica de Newton o el electromagnetismo de Maxwell. Aparte de tener estas aplicaciones, la potencia de la computación cuántica será idónea para resolver problemas cuánticos, como desentrañar la conducta microscópica de un material conductor.

Este ambicioso objetivo de construir un ordenador cuántico universal parece difícil de conseguir con las tecnologías actuales. Aun así, los avances más recientes nos permiten ser optimistas sobre el diseño de sistemas, denominados simuladores cuánticos, que permitan resolver problemas concretos. El primer obstáculo que se debe superar es que necesitamos que los materiales de los que esté hecho el ordenador cuántico estén completamente aislados del exterior. Esta es la única manera que conocemos hoy día para conseguir que las propiedades cuánticas se mantengan durante intervalos de tiempo suficientemente largos como para poder realizar operaciones y cálculos. A este gran aislamiento del exterior hay que añadirle temperaturas ultrafrías, las únicas que permiten, hoy por hoy, obtener fenómenos netamente cuánticos a nivel macroscópico.

Iones atrapados

En la actualidad existen múltiples propuestas de sistemas que quizá en un futuro podrían ser la base de ordenadores cuánticos.



Circuito con 9 bits cuánticos. Este circuito, que necesita una temperatura bajísima para funcionar, es el primero dotado con un sistema de autodetección y autocorrección de errores en sus bits cuánticos. Ha sido desarrollado por el equipo de John Martinis, Julian Keilly, Rami Barends y Austin Fowler, de la Universidad de California en Santa Bárbara.

cos. Una de las más notables es utilizar iones atrapados. La idea de atrapar iones es relativamente simple y se debe al físico Wolfgang Paul (premio Nobel de Física en 1989), quien ideó un método utilizando campos electromagnéticos oscilantes. Se utilizan iones de átomos como el calcio: estos iones quedan atrapados mediante una configuración adecuada de imanes de forma que la fuerza conjunta de los campos magnéticos unida a la repulsión entre los iones hace que se alineen en una recta. El grupo de iones se mantiene así atrapado, flotando en el espacio en un altísimo vacío. Una vez los iones están atrapados podemos hacer que interactúen entre ellos mediante las ondas de sonido del sistema. Podemos visualizarlo como si los iones fuesen pelotas de tenis en una bolsa de plástico. Al estar cargados todos ellos con la misma carga, se repelen, tensando la bolsa. Una vez tensa, los pequeños movimientos de una bola se transmitirán al resto, haciendo vibrar la bolsa. Es decir, si desplazamos ligeramente uno de ellos, el resto notará una fuerza que hará que se muevan igualmente. De este modo pueden aplicarse fuerzas controlables entre los distintos iones.

La puerta de Cirac y Zoller

Veamos a continuación cómo podemos hacer máquinas de calcular con ellos. Para poder fabricar un ordenador cuántico lo primero que necesitamos son las llamadas *puertas lógicas cuánticas*. Recordemos que un ordenador personal opera utilizando diversos artilugios que en última instancia son capaces de realizar operaciones lógicas básicas. El lector recordará, quizá, algunas de ellas, como las tres operaciones básicas, «y», «o» y «no». Por ejemplo, entre dos proposiciones A y B, la conjunción «A y B» dará «verdadero» como resultado únicamente si tanto A como B son proposiciones verdaderas. Si cualquiera de ellas es falsa tendremos que «A y B» será automáticamente falsa. Esto, que es una descripción más o menos formal, no es más que un reflejo de nuestra lógica habitual. Por ejemplo A podría ser A = «En el cielo hay estrellas» y B = «El pan se hace con hari-

na». Las dos proposiciones son ciertas, por lo que la conjunción de ambas A y B = «En el cielo hay estrellas y el pan se hace con harina» también es cierta.

En teoría de la información se abstraen estos conceptos de forma sencilla: a ser cierto se le denomina 1, y a ser falso, 0. Esta abstracción permite expresar toda la lógica a base de ceros y unos y una serie de operaciones entre ellos. Más aún, con este material podemos no solo expresar toda la lógica sino también toda la matemática, permitiéndonos realizar cualquier cálculo.

¿Qué diferencia hay entre los ordenadores cuánticos y los habituales? La principal diferencia es que en los cuánticos las operaciones lógicas se pueden aplicar a estados que no son 0 o 1 de forma completamente definida sino que pueden ser con cierta probabilidad 0 o 1. Si en la computación normal a un estado que puede ser 0 o 1 se le denomina *bit*, en computación cuántica recibe el nombre de *qubit* (como abreviación de bit cuántico). Y aquí es donde entran dos físicos, el español Ignacio Cirac y el austriaco Peter Zoller. Ellos propusieron una manera de realizar una puerta lógica cuántica con sistemas de iones atrapados como los descritos más atrás. Esto ocurrió en 1995 y proporcionó un gran revulsivo a la investigación en ordenadores cuánticos. Parecía que el camino a obtenerlos era ya pan comido. Lamentablemente, aun siendo un paso fundamental, no ha sido todavía posible construir un ordenador cuántico utilizando la puerta de Cirac-Zoller, en parte por la dificultad de poder combinarla con otras puertas. Este es un requisito fundamental, no basta con operar solo con dos unidades de información, pues cualquier intento serio de ordenador cuántico necesita operar con cientos de unidades que deben poder interconectarse.

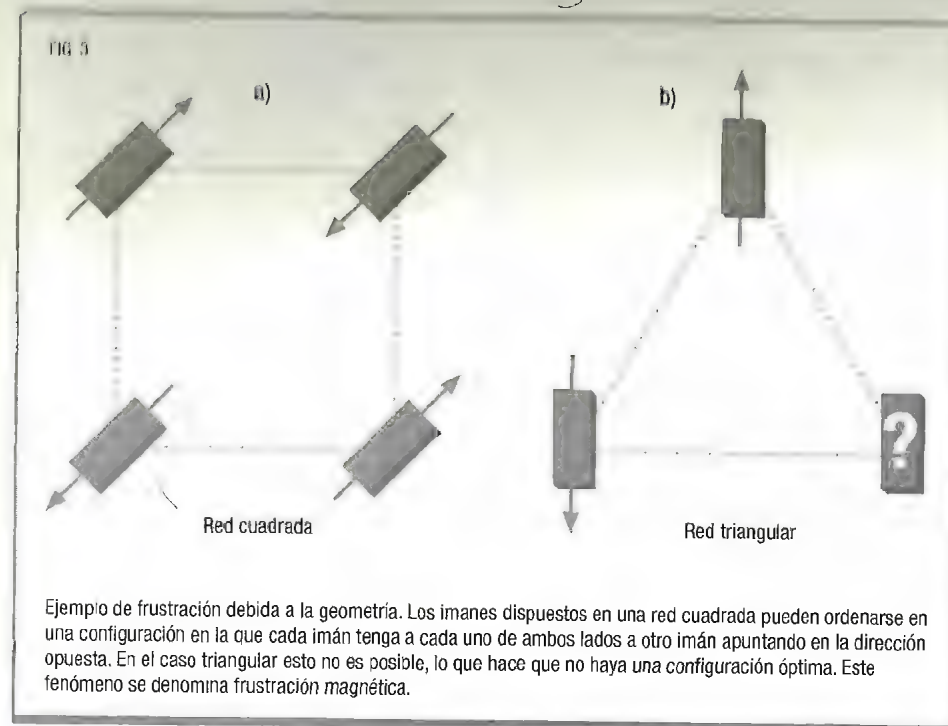
Simuladores cuánticos con gases ultrafríos

La otra gran baza experimental son los gases ultrafríos atrapados en redes ópticas. El esquema experimental es idéntico al descrito al explicar las transiciones de fase cuánticas. Se disponen átomos ultrafríos en trampas que hacen que los átomos se

distribuyan más o menos del mismo modo que se distribuiría un grupo de canicas en una huevera. Las temperaturas son extraordinariamente bajas, del orden del nanokelvin, como las de los condensados de Bose-Einstein del capítulo 3. Con estos átomos dispuestos espacialmente de esta manera ordenada tenemos a nuestro alcance una potente maquinaria con propiedades cuánticas aseguradas.

Lo primero que vale la pena observar es que un átomo que esté situado en uno de los agujeros de la huevera puede hacer básicamente dos cosas: saltar a alguno de los agujeros vecinos o chocar con otro átomo que comparta agujero con él. Estos dos aspectos simplificados resumen lo que puede hacer cualquier objeto: desplazarse o interactuar con otros. En el caso de los átomos ultrafríos los avances han sido tales en los últimos años que las opciones son casi infinitas. Por ejemplo, ahora mismo se puede conseguir que los átomos tengan dos estados internos de forma que actuando sobre ellos se les puede pasar de un estado al otro. Con esto se puede hacer que el sistema de átomos dispuestos como hemos dicho simule una estructura cristalina por la que se desplazan los electrones dando lugar a la conducción de electricidad. La analogía es clara. En un metal tenemos los átomos fijos en una red y los electrones pueden saltar entre las posiciones de la red o también pueden colisionar entre ellos. Esto hace que con sistemas de átomos ultrafríos sea factible simular el comportamiento cuántico de los electrones para intentar desentrañar las bases microscópicas de la conducción eléctrica.

Al mismo tiempo, con estos átomos atrapados se pueden simular los denominados *problemas de espines*. Estos problemas son ubicuos en física y también recientemente en muchos otros ámbitos de la ciencia. Una imagen sencilla de estos problemas sería imaginar que el lector tiene un conjunto de imanes anclados sobre una tabla formando una red. Cada imán sería libre de rotar sobre su centro, como la aguja de una brújula. Este conjunto ordenado de brújulas tiene propiedades francamente interesantes. Por ejemplo, si la distribución es cuadrada, es fácil ver que una de las cosas que «prefieren» los imanes es ponerse todos



alineados, de forma que el norte de cada aguja apunte al sur de la siguiente (figura 3a). Esta configuración es bastante estable, es decir, si giramos levemente una aguja volverá a su posición. Si por el contrario las disponemos en una red triangular, el asunto se complica y ya no es tan fácil encontrar una configuración que claramente sea la más favorable. Aparece el concepto de *frustración*, donde la disposición geométrica de los imanes no permite que se alineen como les gustaría (figura 3b). Este tipo de problemas simplificados ayudan a entender las propiedades magnéticas de los materiales. Los átomos actúan a veces como pequeños imanes. En el caso de los átomos ultrafríos hoy día se pueden disponer en «hueveras» de casi cualquier geometría, como por ejemplo triangular o cuadrada. Incluso se pueden disponer en redes hexagonales, lo que hace que se puedan simular materiales como el polifacético grafeno, cuya fortaleza supe-

SUPERORDENADOR SUPERCONDUCTOR: LA MÁQUINA D-WAVE

Avanzando muy rápidamente, estáis dando un paso de los proyectos que más impulsan esta tecnología de hoy y con el futuro ordenador cuántico. En realidad, tal y como está construido sería más bien un simulador de un determinado tipo de problemas. Se trata de un sistema de circuitos cuánticos realizando únicamente pequeñas cadenas cuánticas hechas con superconductores a temperaturas extremadamente bajas. La idea es utilizar corrientes en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario para representar los estados 0 y 1, respectivamente. Este sistema lo ha llevado a cabo una compañía norteamericana, D-Wave Systems, que promueve que ha desarrollado el primer ordenador cuántico.

Un simulador cuántico operativo

La comunidad científica internacional mira sus primeros resultados con gran recelo, aunque parece que no acepta que las máquinas de D-Wave, aun no siendo ordenadores cuánticos, sí que son lo que podríamos denominar «simuladores cuánticos». La diferencia entre ambos conceptos, ordenador y simulador, es importante. En el primero uno puede programar diversos problemas de diferente índole y naturaleza; en el segundo, lo que se busca es construir un sistema que simule otro más complejo. Por ejemplo, podemos estudiar el lanzamiento de bolas de acero en campo abierto construyendo un pequeño cañón casero y realizando pruebas a pequeña escala. Esto último sería un simulador del problema original. También podemos pensar en los simuladores de vuelo utilizados para entrenar a los pilotos sin necesidad de realizar verdaderos vuelos reales. Estos simuladores solo pretenden resolver el problema para el que han

sido pensados. La máquina de D-Wave, tal y como ha sido desarrollada, sería un simulador cuántico de problemas de espines acoplados. Un sistema que es fascinante por su sencillez y su relación con múltiples problemas de física, desde la formación y estructura de los vidrios hasta la estructura electrónica de los materiales.

Una máquina D-Wave instalada en el departamento de supercomputación avanzada del Centro de Investigación Ames de la NASA.



ra en docientos veces la del acero y está llamado a ser utilizado en múltiples aplicaciones.

CONGELANDO LA VIDA

Comenzábamos este libro recordando al lector lo importante que es para la vida diferenciar lo frío de lo caliente. El frío, argumentábamos, es peligroso para la vida tal y como la conocemos por lo que protegernos de él es una de las más preciadas habilidades que ha desarrollado el ser humano. Por otra parte, el frío nos sirvió para conseguir preservar los alimentos y poder así adquirir una cierta independencia de la coyuntura agrícola, pudiendo desarrollarse ciudades donde millones de individuos consumen productos razonablemente frescos o al menos en buenas condiciones gracias a las técnicas de refrigeración. Así pues, el frío a la vez mata y preserva. En esta sección discutiremos ambas situaciones: por un lado veremos un animal que es capaz de modificarse para no perecer a temperaturas que nos parecerían imposibles de soportar para cualquier forma de vida; por otra parte veremos cómo las técnicas de congelación son utilizadas rutinariamente para congelar embriones, espermatozoides y óvulos humanos, y poder usarlos años más tarde para generar nuevos seres humanos. Esta preservación de algunos tejidos de origen biológico llevó a pensar en la posibilidad de usar la criogenia para congelar a seres humanos después de muertos con la esperanza de que se mantuvieran en un estado razonable que pudiera revertirse a la vida en un futuro.

Tardígrados: vida en el frío extremo

Los humanos no estamos particularmente preparados para vivir a bajas temperaturas. Nuestro cuerpo funciona correctamente a 37 °C y gran parte de nuestro esfuerzo metabólico está consagrado a mantener constante la temperatura corporal. Cuando esta baja de los 35 °C entramos en un estado de *hipotermia*. Los efec-

tos, dependiendo de la temperatura exacta, son devastadores: pérdida del habla, desorientación, pérdida de memoria y según el tiempo que nos mantengamos a dicha temperatura, muerte. Los que trabajan en contacto con el mar saben bien que la hipotermia es uno de los mayores peligros. La muerte por hipotermia es más que probable a partir de dos o tres horas en aguas a 10 °C, mientras que en otras más frías el tiempo disminuye de manera considerable. Claramente, no estamos hechos para sobrevivir en condiciones de frío severo. Existen sin embargo animales que, aunque no viven en condiciones ultrafrías, sí son capaces de soportarlas durante largos periodos de tiempo. Entre ellos, aunque de un tamaño mucho más pequeño que nosotros, tenemos uno que mide apenas un milímetro y que consigue sobrevivir a las temperaturas más extremas. Veamos cómo lo hace.

El animalillo en cuestión es el tardígrado, también llamado oso de agua. Descubierto a finales del siglo XVIII y del que se conocen más de mil especies, tiene cuatro pares de patas y un cuerpo esencialmente transparente. Se lo puede encontrar en casi cualquier sitio, desde mares hasta montañas, pasando por selvas tropicales y otros muchos hábitats. Entre las numerosas virtudes del animal en cuestión se ha descrito su capacidad para aguantar el frío extremo, llegando a durar algunos minutos a nada menos que 1 K, o varios días si la temperatura es algo más suave, de -200 °C. Justo en el rango opuesto, también es capaz de sobrevivir varios minutos a temperaturas superiores a 100 °C. Además, se ha estudiado su capacidad para tolerar dosis de radiación ionizante mil veces mayores que las que podría soportar un ser humano, a presiones como las que hay en los fondos oceánicos más profundos e incluso al vacío del espacio.

El mecanismo más interesante, desde nuestra perspectiva, es el que le permite entrar en *criptobiosis*. Es decir, puede entrar en una especie de estado latente, como el *stand-by* de los aparatos electrónicos, y permanecer así hasta que mejoren las condiciones exteriores. Lo que hace el tardígrado es que, al descender la temperatura, va deshidratándose, pasando de tener un 85% de agua en el organismo a tener más o menos un 3%. En este estado el organismo no puede realizar prácticamente ninguna



Un tardígrado en estado activo. Los tardígrados son animales asombrosos por su extraordinaria capacidad de supervivencia frente a condiciones ambientales adversas. Su resistencia al frío resulta particularmente destacable, ya que pueden sobrevivir varios días a temperaturas del orden de los -200 °C e incluso varios minutos a tan solo un grado por encima del cero absoluto.

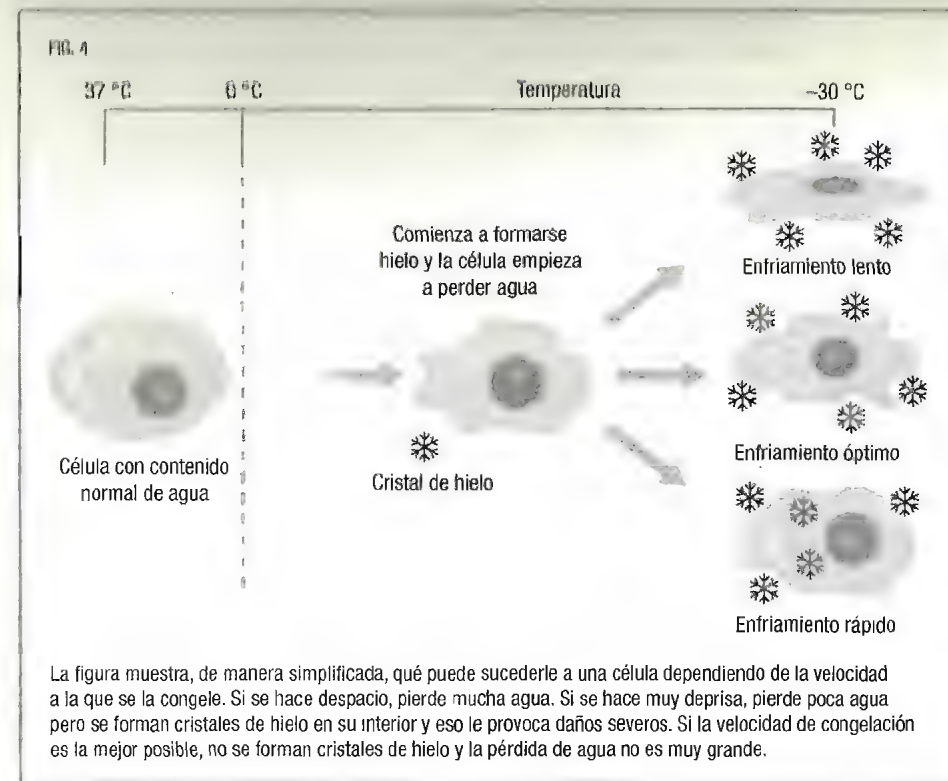
actividad, cesando también su crecimiento y su capacidad reproductiva, un estado vegetativo en el que puede pasar decenas de años. Cuando mejoran las condiciones del entorno, el animal se rehidrata y vuelve a retomar su actividad habitual.

Por si fuera poco, en 2007 un equipo de investigadores envió al espacio un grupo de tardígrados desecados para comprobar si eran capaces de sobrevivir al vacío y la radiación del espacio exterior. Al volver a la Tierra, una proporción elevada de los animalitos volvió a sus actividades normales una vez fueron rehidratados. Esto alimentó la teoría de que quizá estos animales con tanta resistencia habían llegado a la Tierra desde el espacio. Teoría que casi nadie comparte, ya que en nuestro planeta se dan las condiciones adversas suficientes para permitir el desarrollo de animales como este.

Congelando lo que nos comemos

El fabuloso ejemplo del tardígrado nos plantea la cuestión de bajo qué condiciones podemos conservar la vida en suspenso a temperaturas bajas para volver a reanudarla después de transcurrido algún tiempo. Viene aquí a colación el sentido de la palabra congelar, que en muchos idiomas significa detener. Así, podemos decir que una fotografía congela el movimiento de un patinador, en referencia a que lo detiene. Del mismo modo, cuando congelamos un pedazo de carne o un pescado frescos, lo que vemos es que se ralentiza el proceso de putrefacción. Al morir el animal, los microbios comienzan a proliferar hasta que la población microbiana llega a cantidades excesivamente grandes y, por tanto, la ingesta se vuelve peligrosa. El frío del congelador frena el proceso. ¿Podemos, del mismo modo que congelamos la comida, congelar partes del ser humano? Primero revisemos brevemente cómo congelamos la comida.

Los efectos de la congelación a nivel celular (figura 4) se pueden entender del siguiente modo. Una velocidad de congelación lenta tendrá dos efectos: por un lado se formarán cristales de hielo grandes, y, al mismo tiempo, se producirá una pérdida



de agua del interior de las células al bajar la presión osmótica. Esto ocurre debido a que la concentración de sales en el interior de la célula y el medio extracelular está en equilibrio. Si algo cambia, por ejemplo, al comenzar a formarse cristales de hielo en el exterior, aumentando la concentración de las sales, se produce un flujo de agua del interior al exterior para compensar dicha concentración. Esto hace que la célula se deshidrate completamente. Velocidades de congelación excesivamente rápidas tampoco son apropiadas porque se forman demasiados cristales de agua intracelulares, que dañan la propia célula. En general, cada célula tiene su velocidad de congelación óptima.

Es bueno recordar que el frío no suele matar todos los patógenos presentes en la comida; sencillamente hace que no pue-

dan valen de la agua para alimentarse y crecer, ya que esta está completamente congelada. Así, al descongelar el alimento algunos patógenos vuelven a estar operativos; otros por suerte no, como el anisakis. Es importante asegurarnos de que lo que congelamos esté en buen estado, ya que al descongelarlo de nuevo volveremos a tener activos algunos de los microbios que había al principio.

Congelando espermatozoides, óvulos o embriones

Las técnicas de ultracongelación utilizando gases licuados, como el nitrógeno líquido, son relativamente recientes. Dos de los factores que entran en juego son la velocidad a la que se congela la muestra y la técnica utilizada para prepararla. Entre las aplicaciones más interesantes tenemos la congelación con buenas tasas de éxito de espermatozoides, óvulos e incluso embriones. ¡Todos ellos humanos!

Los espermatozoides son los más fáciles de congelar; hay diversos protocolos para llevarlos hasta la temperatura del nitrógeno líquido, 196 grados bajo cero, y mantenerlos congelados durante años. Esto es lo que hacen los bancos de espermatozoides desde que comenzaron a florecer en la década de 1970 en Estados Unidos. Curiosamente, aunque podría parecer lógico que el siguiente en conseguir criopreservarse hubiera sido el óvulo, no fue así: resultó que es mucho más sencillo congelar embriones, aunque tengan más de una célula. El primer éxito en humanos data de principios de la década de 1980. Primero se consiguió un embarazo, pero sin supervivencia, utilizando embriones congelados y poco después nació el primer niño, en 1984. Desde entonces han sido miles los niños que han nacido por este procedimiento. Tanto para espermatozoides como para embriones hay descritas técnicas lentas y de vitrificación (rápidas). La vitrificación es un enfriamiento ultrarrápido en el que las moléculas no tienen tiempo de ordenarse formando un sólido cristalino. Esto se consigue con muestras muy pequeñas que se sumergen directamente en nitrógeno líquido. El grado de

éxito de cada técnica depende de muchos factores, por ejemplo, del estado exacto en el caso de embriones.

Más difícil ha resultado la congelación de óvulos para su fecundación posterior. Para poder preservar correctamente los óvulos, la velocidad del protocolo de congelación es capital. El óvulo tiene una gran cantidad de agua en su interior. Como comentamos antes, el mayor peligro de la congelación es la formación de cristales de hielo que dañen el interior de la célula. Para evitarlo se utilizan los denominados *crioprotectores*, que sustituyen al agua y evitan la formación de cristales. Para óvulos, la vitrificación parece ser últimamente la técnica más eficaz, aun siendo muy reciente comparada con la congelación lenta, que está mucho más establecida.

Nada quema como el frío.

GEORGE R.R. MARTIN

Criogenia: el muerto al... ¡nitrógeno líquido!

Las propiedades conservadoras del frío llevaron a algunos, en los años sesenta del siglo pasado, a desarrollar un campo de la criogenia conocido popularmente como *hibernación artificial*. Bastante común en la ciencia ficción tanto escrita como de la gran pantalla, la idea subyacente es más o menos la que sigue. Si un individuo se muere hoy y lo congelamos de forma adecuada, podremos conservarlo a temperaturas ultrafrías sin deteriorarse, como si de un alimento del frigorífico, un tardígrado o un embrión humano se tratara. En un futuro optimista podría ocurrir que la medicina encontrase una solución a la enfermedad causante de la muerte, con lo que cabría esperar que los médicos del mañana fueran capaces de revertir el proceso y curar al individuo. En principio todo parece razonable: si el tardígrado consigue detener su metabolismo y toda actividad, y después vuelve a funcionar como si nada, ¿por qué no se puede hacer lo mismo con un ser humano? La respuesta no es sencilla. Vaya por delante que nadie hasta ahora ha conseguido congelar un ser humano, vivo, para después descongelarlo desde los -200 °C y de-

volverlo a la vida. Tampoco se ha conseguido con animales y no será porque no se haya intentado. Los daños que hemos comentado anteriormente derivados de la congelación, como la formación de cristales entre las células, provocando tensiones y fracturas, son irreversibles cuando el organismo congelado es grande. Aparte de que no es lo mismo congelar una célula, como en el caso del óvulo, que unas 10^{18} células, que es el número que se estima compone el cuerpo de un humano adulto. Aun utilizando nitrógeno líquido habrá zonas que se congelarán antes que otras, se producirán daños irreparables en algunas de ellas, etc.

Incluso así, desde la década de 1960 hay algunas compañías que ofrecen servicios de ultracongelación (criogenización) *post mortem*. El individuo en cuestión es congelado con nitrógeno líquido y mantenido, si todo va bien, a temperatura constante esperando a que en un futuro la medicina haya avanzado lo suficiente como para, por un lado, saber cómo recalentar el cuerpo sin dañarlo, y por otro volverlo a la vida.

Responder una pregunta en apariencia inocente, «¿cuánto es lo máximo que podemos enfriar?», requirió poner patas arriba los cimientos clásicos de la física y la química. La física cuántica, y con ella el azar y la probabilidad, se afianzaron en las bases de nuestra descripción microscópica de la naturaleza. En este breve recorrido hemos revisado primero los avances de los pioneros para después acercarnos a las fronteras actuales de la ciencia donde el frío casi absoluto es protagonista indiscutible. Estas incluyen desde condensados de Bose-Einstein y simuladores y computadores cuánticos hasta los confines del cosmos, pasando por los laboratorios de partículas y las técnicas de criogenización. Un viaje fascinante que de seguro nos deparará más y más sorpresas en los próximos años.

- BLUNDELL, S.J., *Superconductivity: a very short introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2009.
- EDELMAN, V., *Cerca del frío absoluto*, Moscú, Editorial Mir, 1986.
- JOU, D., *Introducción al mundo cuántico*, Barcelona, Pasado y Presente, 2013.
- LOZANO, M., *El cosmos en la palma de la mano*, Barcelona, Debolsillo, 2009.
- REEVES, H., *Crónicas de los átomos y de las estrellas*, Madrid, Alianza Editorial, 2009.
- SÁNCHEZ, J.M., *El mundo después de la revolución: la física de la segunda mitad del siglo XX*, Barcelona, Pasado y Presente, 2014.
- SHACHTMAN, T., *Absolute zero and the conquest of the cold*, Nueva York, Mariner Books, 1999.
- VIDALI, G., *Superconductivity: the next revolution?*, Cambridge, Cambridge University Press, 1993.
- ZEMANSKY, M.W. Y DITTMAN R.H., *Calor y termodinámica*, Madrid, Editorial Aguilar, 1979.

- agujero negro 107, 108
 aislante de Mott 125, 126
 Amontons, Guillaume 30, 31, 46,
 71, 72
 anisotropías 110, 111, 113

 Bardeen, John 60
 Big Bang 11, 109, 112, 113
 Boltzmann, Ludwig 29, 79
 Bose, Satyendra Nath 9, 10, 69,
 74, 79, 83, 87
 bosones 10, 62, 72, 74-76, 78, 82,
 85, 118
 Broglie, Louis de 80

 Caronte 11, 104-106
 Celsius, Anders 33
 Ceres 103-105
 CERN 11, 74, 117-120
 cero absoluto 8-11, 30-32, 37, 39,
 50, 56, 63, 68, 72, 97, 103, 112,
 119, 137

 Chu, Steven 64
 Cirac, Ignacio 130, 131
 CMB *véase* radiación de fondo de
 microondas
 COBE 110, 111, 113, 114
 Cohen-Tannoudji, Claude 64, 88
 computador cuántico 117, 127-
 131, 134, 142
 condensado de Bose-Einstein 10,
 62, 69, 72, 73, 78-83, 85-87, 107,
 117, 127, 132, 142
 congelación
 de embriones 11, 12, 37, 135,
 140, 141
 de óvulos 11, 12, 135, 140-
 142
 Cooper, Leon Neil 60, 61
 Cornell, Eric 84, 86, 87, 97
 correlaciones cuánticas 87-89
 criogenia 135, 141
 cuerpo negro 79, 101, 102, 107,
 109

Dewar, James 58
 diablillo de Maxwell 18, 19
 D-Wave 134

efecto
 Doppler 65-67
 Joule-Thomson 48, 57, 58, 63, 83
 Einstein, Albert 9, 10, 55, 69, 79, 83, 87-89
 enana blanca 75
 enfriamiento mediante láser 10, 63, 64, 66-68, 84, 86
 entrelazamiento cuántico 89
 EPR 88
 equilibrio térmico 7, 16, 17, 42
 estrella de neutrones 10, 75

Fahrenheit, Daniel Gabriel 33
 fermiones 10, 62, 72, 74-78, 82
 física cuántica 9, 39, 50, 52, 55, 72, 87, 88, 117, 127, 142
 frigorífico 41, 42, 44, 46, 47, 141
 frío lunar 10, 11, 97-99

gas ideal 26, 47
 Gay-Lussac, Joseph Louis 29, 31, 32

helio 9, 18, 25, 48, 56-58, 62-64, 73, 83, 101, 121
 Hess, Harald 83

iones atrapados 128, 130, 131

Janssen, Pierre Jules 56

Kamerlingh Onnes, Heike 57-62, 73, 121

Kapitsa, Piotr 52, 73, 74
 Kelvin, lord (William Thomson) 32, 72
 Ketterle, Wolfgang 84-87
 Kleppner, Dan 82, 83

Lambert, Johann Heinrich 32

ley
 de Boyle 26
 de Charles 26
 de Gay-Lussac 26
 de Planck 102
 leyes de los gases 26
 LHC 117, 118, 120, 121
 licuefacción
 del helio 9, 57, 58, 62, 63, 73, 83
 del hidrógeno 35, 48, 58

mar de Fermi 75, 77, 78
 melaza óptica 68

nevero artificial 44, 45

ordenador cuántico *véase*
 computador cuántico

paradoja de Olbers 108
 Paul, Wolfgang 130
 Penzias, Arno 63, 110-113
 Phillips, William D. 64
 Planck, Max 97, 102
 Plutón 11, 37, 104, 106
 Podolski, Borís 88

principio
 de exclusión de Pauli 10, 75, 77
 de incertidumbre de Heisenberg 55
 puerta de Cirac-Zoller 130, 131

radiación de fondo de
 microondas 11, 63, 108-113
 Rosen, Nathan 89
 Rutherford, Ernest 52, 57, 73

Sadi Carnot, Nicolas Léonard 16, 32
 Schrieffer, John Robert 61
 segundo principio de la
 termodinámica 18
 simulador cuántico 117, 127, 128, 131, 134, 142
 superconductividad 11, 37, 56, 60, 62, 72, 73, 98, 119, 121, 134
 superfluidez 56, 60, 62, 72, 73, 106, 125, 127

tardígrado 37, 135-138, 141

termómetro de gas 20, 21, 30, 31, 71
 Thompson, Benjamin 16
 Thomson, William *véase* Kelvin, lord
 transiciones de fase cuánticas 117, 121, 125, 127, 131
 Tudor, Frederic 42, 44-46

Vesta 103, 104
 vitrificación 140, 141

Wieman, Carl 84, 86, 87, 97
 Wilson, Robert 63, 110-113
 WMAP 111, 113, 114

Zoller, Peter 130, 131

El frío absoluto

Conceptos tan cotidianos como el frío y el calor están profundamente relacionados con la estructura más íntima de la materia. Siglos de experimentación nos permitieron prever la existencia de una frontera, la del frío absoluto. Explorarla requirió avanzar en nuestro conocimiento en todos los ámbitos, desde los puramente técnicos hasta los que llevaron a la reformulación del marco conceptual que utilizamos para describir la naturaleza. Cerca del cero absoluto, los aspectos más fascinantes de la física cuántica cobran un protagonismo inusitado.

Bruno Juliá Díaz es investigador Ramón y Cajal en la Universidad de Barcelona e investigador visitante del Instituto de Ciencias Fotónicas de Castelldefels (Barcelona).